

DARLESSANDRO DA SILVA RIBEIRO

**ESTUDOS DE ACESSO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM
REDES DE SUBTRANSMISSÃO MEDIANTE UM
APLICATIVO COMERCIAL DE FLUXO DE POTÊNCIA
ÓTIMO**

**FLORIANÓPOLIS
2009**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTUDOS DE ACESSO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM
REDES DE SUBTRANSMISSÃO MEDIANTE UM
APLICATIVO COMERCIAL DE FLUXO DE POTÊNCIA
ÓTIMO**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

DARLESSANDRO DA SILVA RIBEIRO

Florianópolis, Março de 2009.

ESTUDOS DE ACESSO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM REDES DE SUBTRANSMISSÃO MEDIANTE UM APLICATIVO COMERCIAL DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

Darlessandro da Silva Ribeiro

‘Esta dissertação foi julgada adequada como um dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Sistemas de Energia Elétrica*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina’.

Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.
Orientador

Prof^a. Kátia Campos de Almeida, Ph.D.
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.
Orientador

Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D.

Prof. Erlon Cristian Finardi, D.Eng.

Dedico este trabalho:
Aos meus pais,
Custódia da Silva Rodrigues e
Pedro Frederico Ribeiro In Memoria.

AGRADECIMENTOS

A Deus que me concedeu saúde, força, sabedoria e motivação para a realização desse trabalho. Todo louvor a Ele que me surpreende a cada dia com suas bênçãos e não tenho palavras para expressar minha gratidão;

A minha sincera gratidão à minha família, aos meus pais Pedro Frederico e Custódia, e à minha irmã Aurení, por sempre acreditarem e apoiarem meu desenvolvimento profissional, sem os quais essa conquista não teria acontecido

Ao meu orientador Hans Helmut Zürn pelo incentivo, amizade, orientação e por acreditar no meu trabalho;

Agradeço também a todos os professores com quem tive a valiosa oportunidade de estudar, enquanto aluno do Programa de Pós Graduação de Engenharia Elétrica da UFSC em especial aos professores Antônio Simões Costa, Roberto de Souza Salgado e Roberto De Pieri pelo apoio, companheirismo e conhecimento compartilhado comigo.

E, como não poderia deixar de citar, a impossibilidade de agradecer em poucas palavras e com justiça todo o apoio recebido nestes anos de trabalho no LABSPOT/PPGEEL. Mas é preciso dizer que foram muitos os que me ajudaram, amigos, colegas e funcionários. De maneira especial cito a grande contribuição dos amigos: David G. Takemura, Marcio Lachman, Juliano Shier, Fernanda Souza Senna, Luciano M. Coelho, Cássio F. B. Nonenmacher, Rodrigo Rodrigues, Walerio e Rodrigo Sória pela companhia, amizade, alegrias e longas jornadas de estudos;

As demais pessoas especiais que me apoiaram de alguma forma, e inúmeras outras que não estou citando aqui mas que foram importantes para eu conseguir alcançar meus objetivos.

Resumo da Dissertação apresentado a UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

ESTUDOS DE ACESSO DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA EM REDES DE SUBTRANSMISSÃO MEDIANTE UM APLICATIVO COMERCIAL DE FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

Darlessandro da Silva Ribeiro

Março/2009

Orientador: Hans Helmut Zürn, PhD.

Área de Concentração: Sistema de Energia Elétrica.

Palavras-chave: Geração Distribuída, Fluxo de Potência Ótimo, Sistemas de Distribuição, Sistema Elétrico de Potência.

Número de Páginas: 108.

RESUMO: As mudanças recentes de estrutura no sistema elétrico (geração, transmissão, subtransmissão, distribuição e comercialização de energia) têm motivado a interligação da geração distribuída aos sistemas de potência. Outro fato importante é que as empresas e concessionárias de energia elétrica estão constantemente buscando novas alternativas para atuar sobre a correção do perfil de tensão e a minimização de perdas nos alimentadores das redes de distribuição e subtransmissão de energia elétrica. O sistema analisado é uma pequena parte da rede real de distribuição e subtransmissão de energia elétrica do Oeste Catarinense e a ferramenta utilizada para a realização das simulações e obtenção dos resultados foi o simulador de redes: FLUPOT (Fluxo de Potência Ótimo). Como a GD ainda é uma tecnologia recente, existem até então muitas lacunas quanto ao entendimento do impacto desta nova topologia na estabilidade e em outros índices de desempenho em regime permanente do sistema elétrico. Neste trabalho de pesquisa determinou-se o impacto da inserção da geração distribuída em sistemas de potência associados aos seguintes aspectos técnicos: variação do perfil de tensão do sistema em regime permanente, perdas elétricas de potência ativa e reativa, e maximização do carregamento. Diversos cenários e condições de carregamento do sistema foram considerados com o intuito de contribuir quanto ao estudo teórico deste problema, em relação ao comportamento do sistema.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

STUDIES OF ACCESS OF GENERATION DISTRIBUTED IN NETWORKS OF SUBTRANSMISSION BY A COMMERCIAL APPLICATION OF OPTMAIL POWER FLOW

Darlessandro da Silva Ribeiro

Março/2009

Advisor: Hans Helmut Zürn, PhD.

Area of Concentration: Electrical Power System.

Keywords: Distributed Generation, Optimal Power Flow, Distribution Networks, Electric Power System.

Number of Pages: 108.

ABSTRACT: The recent changes in the structure of the electric system (generation, transmission, subtransmission, distribution and energy marketing) have motivated the interconnection of distributed generation in power systems. Another important fact is that companies and electric energy concessionaires are constantly seeking new opportunities to work on the voltage profile correction and minimizing losses in the networks distribution feeders and electricity subtransmission. The system analyzed is a small part of the real electricity distribution and subtransmission of the Santa Catarina State West side and the tool used to perform the simulations and obtain the results was the network simulator: FLUPOT (Optimal Power Flow). Since the GD is still a new technology, there is so far very limited understanding about the impact of this new topology on the stability and other indices of performance under steady state. In this research the impact was determined of the distributed generation integration in power systems associated with the following technical aspects: permanent variation in the voltage profile system, electrical power losses of active and reactive power, and maximization of the load. Various scenarios and loading conditions of the system were considered in order to aid on the theoretical study of this problem on the behavior of the system.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações Iniciais.....	1
1.2. Objetivos Gerais.....	2
1.3. Organização do trabalho.....	3
2. GENERALIDADES SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, ASPECTOS CONSTRUTIVOS E TÉCNICOS.....	5
2.1. Introdução.....	5
2.2. Estrutura e Componentes do sistema de Potência.....	6
2.2.1. Geração de Energia Elétrica.....	7
2.2.2. Linhas de Transmissão.....	7
2.2.3. Linha de Distribuição.....	8
2.2.4. Máquina Síncrona.....	9
2.2.5. Regulador Automático de Tensão.....	9
2.2.6. Cargas.....	9
2.3. Geração Distribuída.....	10
2.4. Legislação e Regulamentação da Geração Distribuída.....	12
2.4.1. Condições Gerais para conexão de Geração Distribuída.....	16
2.5. Conceitos e Definições de Geração Distribuída.....	17
2.6. Vantagens e Desvantagens da Implantação da Geração Distribuída.....	20
2.7. Fontes Primárias de Energia e suas transformações.....	21
2.7.1. Carvão Mineral.....	23
2.7.2. Petróleo.....	24
2.7.3. Água.....	24
2.7.4. Energia nuclear.....	24
2.7.5. Sol.....	25
2.7.6. Ventos.....	25
2.7.7. Biomassa.....	25
2.7.8. Energia Geotérmica.....	26
2.7.9. Marés.....	26

2.7.10.	Biodiesel	26
2.8.	Conclusões.....	27
3.	PRINCIPAIS TECNOLOGIAS E IMPACTOS DA GD	28
3.1.	Introdução.....	28
3.2.	Sistemas de Energia Eólica	28
3.2.1.	Potência Gerada pela Turbina Eólica	31
3.2.2.	Tipos de Geradores Eólicos.....	32
3.3.	Sistemas Eólicos Situados sob Águas (Offshore Wind Systems)	33
3.4.	Sistemas Fotovoltaicos - Energia Solar	34
3.4.1.	Características das Células Fotovoltaicas.....	36
3.4.2.	Outros Equipamentos Requeridos em Sistemas Fotovoltaicos	38
3.5.	Células a Combustível	38
3.6.	Microturbinas	40
3.7.	Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH's).....	41
3.8.	Impactos nos Níveis de curto-circuito e ajustes de Proteção.....	42
3.9.	Impactos na Regulação de Tensão.....	43
3.10.	Impactos na Qualidade de Energia.	44
3.11.	Impactos nos Índices de Confiabilidade.....	45
3.12.	Impactos do Ilhamento.	46
3.13.	Impacto na Análise de Redes de Distribuição.....	47
3.14.	Impactos na Estabilidade dos Sistemas de Potência.....	48
3.15.	Impacto Causado Pela Mudança de Níveis de Penetração.....	48
3.16.	Impacto Causado Pelos Diferentes Tipos de Geração.....	49
3.17.	Conclusões.....	51
4.	FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO	52
4.1.	Introdução.....	52
4.2.	A Origem do Fluxo de Potência Ótimo	53
4.3.	O Fluxo de Potência Ótimo.	54
4.4.	Método de Pontos Interiores.....	55
4.4.1.	Condições de Otimalidade.....	57
4.4.2.	Resolução do Sistema de Equações.....	58
4.4.3.	Passo Primal-Dual	60
4.4.4.	Atualização do Parâmetro Barreira.....	61

4.5.	Programa FLUPOT	62
4.5.1.	Funções Objetivo	62
4.5.2.	Custo de Geração de Potência Ativa	62
4.5.3.	Perdas	63
4.5.4.	Controle de Tensão	63
4.5.5.	Custo de Geração de Potência Reativa	64
4.5.6.	Máximo Carregamento	65
4.5.7.	Geração de Potência Ativa	65
4.5.8.	Tensão em Barra PV	66
4.6.	Aspectos da Metodologia	66
4.6.1.	Processos de Decomposição	66
4.7.	Conclusão	67
5.	ANÁLISE E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS	68
5.1.	Introdução	68
5.2.	Considerações Iniciais sobre o Sistema Estudado	68
5.3.	Análise de Maximização da Geração do Sistema	70
5.3.1.	Maximização da Potência Ativa Gerada com 1GD	70
5.3.2.	Maximização da Potência Ativa Gerada com 2GD	72
5.4.	Análise de Maximização do Carregamento do Sistema	74
5.4.1.	Maximização da Carga sem GD	74
5.4.2.	Maximização da Carga com 1GD	75
5.4.3.	Maximização da Carga com 2GD	76
5.5.	Análise através das Perdas	78
5.5.1.	Minimização das Perdas sem GD	78
5.5.2.	Minimização das Perdas com 1GD	80
5.5.3.	Minimização das Perdas com 2GD	82
5.6.	Análise através do Controle de Tensão.	84
5.6.1.	Otimização com Controle de Tensão sem GD	84
5.6.2.	Otimização com Controle de Tensão com 1GD	86
5.6.3.	Otimização com Controle de Tensão com 2GD	89
5.7.	Análise comparativa “Controle de Tensão X Perdas”	91
5.7.1.	Confronto “Controle de Tensão x Perdas’ sem GD.	91
5.7.2.	Confronto “Controle de Tensão x Perdas’ com 1GD	93

5.7.3.	Confronto “Controle de Tensão x Perdas’ com 2GD.....	94
5.8.	Conclusão.....	96
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	
	97	
6.1.	Introdução.....	97
6.2.	Conclusões.....	97
6.3.	Sugestões para trabalhos futuros.	98
	ANEXO I – ARQUIVO DE REDE – CARGA INICIAL	99
	ANEXO II – ARQUIVO DE REDE – CARGA INICIAL AUMENTADA DE 10%	100
	ANEXO III – ARQUIVO DE REDE – CARGA INICIAL AUMENTADA DE 20%	101
	ANEXO IV – ARQUIVO DE REDE – CONEXÃO DE 1GD	102
	ANEXO V – ARQUIVO DE REDE – CONEXÃO DE 2GD.....	103
	ANEXO VI – ARQUIVO DE OTIMIZAÇÃO - FPO	104
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Sistema Elétrico ilustrando os principais equipamentos.....	5
Figura 2.2 – Modelo π para linhas de transmissão.	8
Figura 2.3 – Arranjo Geral de um Sistema Elétrico de Potência.....	10
Figura 2.4 – Representação gráfica de um Sistema elétrico com GD	11
Figura 2.5 – Sistema elétrico com inserção da Geração Distribuída.....	19
Figura 2.6 – Diferentes Fontes de geração de energia distribuídas	19
Figura 2.7 – Participação dos Diversos Recursos Energéticos Disponíveis a Utilização no Brasil (fonte: Ministério de Minas e Energia)	22
Figura 3.1 – Corte Transversal de um Módulo Fotovoltaico.	36
Figura 3.2 – Ilustração de um circuito fotovoltaico.....	37
Figura 3.3 – Sistema Simplificado de uma Célula a Combustível.	39
Figura 3.4 – Esquema da Microturbina.	41
Figura 3.5 – Ilustração da proteção do nível de curto-circuito com a inclusão de unidades de geração distribuída.	43
Figura 3.6 – Regulação de tensão com a inclusão da geração distribuída.....	44
Figura 3.7 – Exemplo de Ilhamento que pode ocorrer em uma área do sistema de distribuição.	46
Figura 4.1 – Estrutura Hierárquica da Metodologia.....	67
Figura 5.1 – Diagrama da área do sistema de subtransmissão estudado	69
Figura 5.2 – Perfil de Tensão devido a Maximização da Potência Ativa gerada – 1GD. ...	72
Figura 5.3 – Perfil de Tensão devido a Maximização da Potência Ativa gerada – 2GD. ...	73
Figura 5.4 – Perfil de Tensão devido a Maximização do carregamento	77
Figura 5.5 – Maximização do carregamento	77
Figura 5.6 – Incrementos suportados pelo sistema em cada cenário.....	78
Figura 5.7 – Perfil de tensão com o controle das perdas sem GD.....	80
Figura 5.8 – Perfil de tensão com o controle das perdas – 1GD	82
Figura 5.9 – Perfil de tensão com o controle das perdas – 2GD	84
Figura 5.10 – Perfil de tensão com o controle de tensão – sem GD.....	86
Figura 5.11 – Perfil de tensão com o controle de perdas 1GD.....	88
Figura 5.12 – Perfil de tensão com o controle de tensão - 2GD.....	91
Figura 5.13 – Perdas x Controle de Tensão – sem GD.	91

Figura 5.14 – Perdas x Controle de Tensão – sem GD.	92
Figura 5.15 – Perdas x Controle de Tensão – sem GD.	92
Figura 5.16 – Perdas x Controle de Tensão – 1GD.	93
Figura 5.17 – Perdas x Controle de Tensão – 1GD – 10%.	93
Figura 5.18 – Perdas x Controle de Tensão – 1GD – 20%.	94
Figura 5.19 – Perdas x Controle de Tensão – 2GD.	94
Figura 5.20 – Perdas x Controle de Tensão – 2GD – 10%.	95
Figura 5.21 – Perdas x Controle de Tensão – 1GD – 20%.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Empreendimentos em Operação no Brasil, 2009.	23
Tabela 3.1 – Tipos de Células a Combustível.	40
Tabela 3.2 – Evolução das PCH's no Brasil.....	42
Tabela 5.1 – Cálculo da maximização da potência ativa carga inicial.	71
Tabela 5.2 – Cálculo da maximização da Potência Ativa carga acrescida de 10%.....	71
Tabela 5.3 – Cálculo da maximização da Potência Ativa carga acrescida de 20%.....	71
Tabela 5.4 – Cálculo da maximização da Potência Ativa carga inicia.....	72
Tabela 5.5 – Cálculo da maximização da Potência Ativa carga acrescida de 10%.....	72
Tabela 5.6 – Cálculo da maximização da Potência Ativa carga acrescida de 20%.....	73
Tabela 5.7 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo maximizando as cargas - Sem GD.	74
Tabela 5.8 – Maximização da carga sem GD.....	75
Tabela 5.9 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo maximizando as cargas - 1 GD.	75
Tabela 5.10 – Maximização da carga com 1GD.	75
Tabela 5.11 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo maximizando as cargas - 2 GD.	76
Tabela 5.12 – Maximização da carga com 2 GD.	76
Tabela 5.13 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo otimizando as perdas elétricas - Sem GD-Inicial.....	79
Tabela 5.14 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo otimizando as perdas - Sem GD - 10%.	79
Tabela 5.15 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo otimizando as perdas - Sem GD - 20%.	79
Tabela 5.16 – Minimização das perdas elétricas - Sem GD.....	79
Tabela 5.17 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 1 GD com carga inicial.....	80
Tabela 5.18 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 1 GD com incremento na carga de 10%.....	81
Tabela 5.19 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 1 GD com incremento na carga de 20%.....	81
Tabela 5.20 – Minimização das Perdas elétricas na presença de 1 GD.....	81
Tabela 5.21 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 2 GD com carga inicial.....	82
Tabela 5.22 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 2 GD com incremento na carga de 10%.....	83

Tabela 5.23 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 2 GD com incremento na carga de 20%.....	83
Tabela 5.24 – Cálculo das perdas elétricas com a presença de 2 GD.....	83
Tabela 5.25 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo otimizando o C. de Tensão - Sem GD.	85
Tabela 5.26 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo otimizando - Sem GD - 10%.....	85
Tabela 5.27 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo otimizando o C. de Tensão - Sem GD - 20%.....	86
Tabela 5.28 – Otimização da carga com Controle de Tensão – sem GD.....	86
Tabela 5.29 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 1GD com carga inicial.....	87
Tabela 5.30 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 1GD com incremento na carga de 20%.....	87
Tabela 5.31 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 1GD com incremento na carga de 20%.....	88
Tabela 5.32 – Otimização da carga com Controle de Tensão 1GD.	88
Tabela 5.33 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 2 GD com carga inicial.....	89
Tabela 5.34 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 2 GD com incremento na carga de 10%.....	89
Tabela 5.35 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 2 GD com incremento na carga de 20%.....	90
Tabela 5.36 – Otimização da carga com Controle de Tensão – 2 GD.	90

4. FLUXO DE POTÊNCIA ÓTIMO

4.1.Introdução

Neste capítulo são mostradas a origem e a formulação matemática do problema do FPO. É também apresentada algumas das técnicas utilizadas para solucioná-lo.

A aplicação do FPO tem um campo bastante amplo e abrange o planejamento da operação e da expansão além da operação em tempo real. O FPO nos dá a informação satisfatória de um critério econômico ou elétrico como, por exemplo, a minimização das perdas na transmissão ou a minimização do custo de geração e, em linhas gerais, sua solução abrange:

- A determinação de quais barras necessitam de compensação reativa do tipo síncrona ou estática (capacitiva ou indutiva);
- O despacho de potência ativa e reativa;
- A determinação dos valores dos Taps em LTC e a obtenção do ângulo para transformadores defasadores;
- A determinação das magnitudes de tensão e dos ângulos das barras do sistema elétrico;
- A determinação dos fluxos ativos nas linhas de transmissão;
- O cálculo do máximo carregamento e do mínimo corte de carga para efeito de análise de colapso de tensão;
- Em sistemas interligados, o cálculo da máxima potência a ser transferida com segurança de uma área a outra;

Os aumentos desordenados da carga dos sistemas elétricos, associados à falta de investimentos no setor, aumentam o risco de instabilidade de tensão, fenômeno que provoca o colapso de tensão e a interrupção do fornecimento de energia elétrica. Em circunstâncias como essa, o FPO é uma ferramenta eficiente na pesquisa de um ponto de operação que vá otimizar os recursos disponíveis. Pesquisas específicas sobre estabilidade de tensão encontram-se em (KENJI, HIROSHI, MASANAO, & TSUTOMU, **1991**), (FLATABO, OGNEDAL, & CARLSEN, 1990).

4.2. A Origem do Fluxo de Potência Ótimo

Desde a década de 20, existe o interesse em operar os sistemas elétricos através de critérios econômicos (DAVISON, 1922). O precursor do FPO, como pode ser considerado o despacho econômico visa alocar economicamente a carga entre as unidades geradoras com custos e características diferentes, de modo a atender a demanda global do sistema.

Em (STEINBERG & SMITH, 1934) é evidenciado que a solução mais econômica era operar todas as unidades geradoras ao mesmo custo incremental e desconsiderando as perdas na transmissão esta solução é conseguida através do seguinte problema:

$$\min \sum_{i=1}^{ng} ct_i \cdot p_{g_i} \quad (4.1)$$

Sujeito a

$$\sum_{i=1}^{ng} p_{g_i} = p_d \quad (4.2)$$

onde:

$ct_i(\cdot)$ função de custo do gerador i

p_{g_i} geração ativa no gerador i

p_d demanda total do sistema

ng número de unidades geradoras

A função lagrangeana de (4.1) e (4.2) é dada por:

$$L = \sum_{i=1}^{ng} [ct_i \cdot p_{g_i} - \lambda p_{g_i}] + \lambda p_d \quad (4.3)$$

Como os custos de geração são dados por funções convexas, a solução ótima do problema será obtida pela condição estacionária da função lagrangeana:

$$\frac{\partial L}{\partial p_{g_i}} = \frac{\partial ct_i(p_{g_i})}{\partial p_{g_i}} - \lambda = 0 \quad i = 1, 2 \dots ng \quad (4.4)$$

Ou seja

$$\lambda = \frac{\partial ct_i(p_{g_i})}{\partial p_{g_i}} \quad i = 1, 2 \dots ng \quad (4.5)$$

O custo marginal de operação do sistema é representado pelo multiplicador de Lagrange λ , o que significa que todos os geradores devem operar com o mesmo custo marginal como pode ser observado nas equações (4.4) e (4.5).

Nesta formulação, não foram contemplados as restrições dos sistemas de geração e transmissão e nem as perdas elétricas, sendo considerado apenas o atendimento à demanda global. Posteriormente foram inseridos no problema de despacho econômico os limites de geração das unidades, o que altera a solução do problema, pois apesar de continuar com o objetivo de igualar os custos marginais entre as unidades, os limites de geração podem impedir que algumas unidades operem no mesmo custo marginal do sistema. Também foram incluídas as perdas elétricas através de uma função quadrática da geração ativa.

Por volta dos anos 60, o problema do despacho econômico foi novamente incrementado com a introdução da representação de toda a rede elétrica, resultando no modelo de FPO.

4.3. O Fluxo de Potência Ótimo.

O FPO é um termo genérico que envolve uma grande classe de problemas nos quais se busca otimizar uma função específica, satisfazendo restrições que são regidas por particularidades operacionais e físicas da rede elétrica e que foi formulado primeiramente por J. Carpentier (CARPENTIER, 1932).

O objetivo da resolução de um FPO em um sistema de potência é definir um conjunto de ações de controle que eliminem as violações operativas do sistema, tais como violações no perfil de tensão de barras do sistema, violações no carregamento dos

circuitos, desbalanços entre carga e geração, dentre outras. Entre as ações de controle realizadas pelo FPO, pode-se citar a atuação sobre a injeção de potência ativa e reativa dos geradores, modificações nos taps dos transformadores e desligamentos forçados de cargas do sistema.

Por ser um problema de programação não-linear com restrição, o problema de Fluxo de Potência Ótimo pode ser definido matematicamente como:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) \\ \text{s.a.} \quad & g(x) = 0 \\ & h(x) \leq 0 \\ & l \leq x \leq u \end{aligned} \tag{4.6}$$

onde:

x vetor de variáveis do sistema

$g(x)$ restrições de igualdade

$h(x)$ restrições de desigualdade

u, l limites superior e inferior dos controles

A modelagem da rede (equações e inequações de balanço de potência reativa e ativa em cada nó da rede é representada pelas restrições de igualdade, enquanto que os limites das variáveis do sistema (restrições funcionais dos equipamentos e operacionais do sistema) são representadas pelas restrições de desigualdade

4.4. Método de Pontos Interiores.

A metodologia de Pontos Interiores Primal-Dual será estudada nessa dissertação pois é o método utilizado no programa FLUPOT, ferramenta computacional utilizada nos estudos e simulações.

O Método de Pontos Interiores está inserido inicialmente em uma categoria de algoritmos voltados à solução de problemas de programação linear, todavia esse método abrangeu problemas de programação convexa, quadrática e de uma forma geral problemas de otimização diferenciáveis devido seu alto grau de rendimento.

Em problemas de Fluxo de Potência Ótimo, o emprego do Método de Pontos Interiores normalmente são aplicadas em duas estratégias diferentes. Um emprega o método a um problema de programação linear obtido pela linearização das equações de balanço de potência ativa e reativa do algoritmo de fluxo de potência. O outro é o Método dos Pontos Interiores Direto, que consiste em aplicar o método de pontos interiores diretamente ao problema de programação não-linear original do FPO.

O problema de FPO mostrado na equação (4.17) pode ser reformulado, sem que perca sua generalidade, como:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) \\ \text{s.a.} \quad & h(x) = 0 \\ & 1 \leq x \leq u \end{aligned} \tag{4.7}$$

onde:

$h(x)$ equações de balanço e as restrições funcionais

$u, 1$ limites das variáveis de controle, variáveis de estado e folgas associadas às restrições funcionais.

Incluindo as variáveis de folga $s1$ e $s2$, as restrições de desigualdade se transformam em restrições de igualdade, tornando-se:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x) \\ \text{s.a.} \quad & h(x) = 0 \\ & x - s1 = 1 \\ & x + s2 = u \\ & s1, s2 \geq 0 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Na metodologia dos Pontos Interiores as variáveis de folga são introduzidas à função-objetivo através de uma função penalizadora, nomeada de barreira logarítmica. Com isto, o problema original é modificado e se torna em uma sequência de problemas parametrizados pelo parâmetro de barreira (μ), como é mostrado a seguir:

$$\begin{aligned} \min f(x) - \mu \cdot \sum_{i=1,n} \log(s_{1i}) - \mu \cdot \sum_{i=1,n} \log(s_{2i}) \\ \text{s.a.} \quad h(x) = 0 \end{aligned} \quad (4.9)$$

Após a barreira logarítmica ter sido incorporada, o Método de Pontos Interiores procura otimizar o problema ilustrado na fórmula (4.20) para cada valor de μ , fazendo com que μ tenda a zero. Desta maneira é executada uma iteração para cada μ individualmente, utilizando-se do sistema de equações não lineares.

4.4.1. Condições de Otimalidade

Em (BAZARAA & SHETTY, 1979), Karush-Kuhn-Tucker nos dá as condições de otimalidade de primeira ordem, associando a seguinte função Lagrangeana (4.9):

$$L(x, \lambda, \pi_1, \pi_2, s_1, s_2) = f(x) - \mu \sum_{i=1,n} \log(s_{1i}) - \mu \sum_{i=1,n} \log(s_{2i}) - \lambda^T h(x) - \pi_1^T (x - s_1 - 1) - \pi_2^T (x + s_2 - u) \quad (4.10)$$

Na equação (4.10) existe em $(x, \lambda, \pi_1, \pi_2, s_1, s_2)$ um lugar certo e estacional que satisfaz:

$$(\nabla L_x) \quad \nabla f(x) - \lambda^T \nabla h(x) - \pi_1 - \pi_2 = 0 \quad (4.11)$$

$$(\nabla L_\lambda) \quad h(x) = 0 \quad (4.12)$$

$$(\nabla L_{s_1}) \quad x - s_1 = 1 \quad (4.13)$$

$$(\nabla L_{s_2}) \quad x - s_2 = u \quad (4.14)$$

$$(\nabla L_{s_1}) \quad \pi_1 = (s_1)^{-1} \cdot \mu e \quad (4.15)$$

$$(\nabla L_{s_2}) \quad \pi_2 = -(s_2)^{-1} \cdot \mu e \quad (4.16)$$

onde:

∇f gradiente da função-objetivo em x

∇h gradiente das restrições de igualdade em x

λ multiplicador de Lagrange associado à restrição $h(x) = 0$

π_1 multiplicador de Lagrange associado à restrição $x - S_1 = 1$

π_2 multiplicador de Lagrange associado à restrição $x + S_2 = u$

e vetor de componentes unitários

S1 matriz diagonal de componentes S1i

S2 matriz diagonal de componentes S2i

4.4.2. Resolução do Sistema de Equações

Aplicando-se do método de Newton-Raphson ao sistema de equações (4.11) - (4.16), obtém-se o seguinte sistema de equações de segunda ordem:

$$\left[\nabla^2 f(x) - \lambda^T \cdot \nabla^2 h(x) \right] \Delta x - \nabla h(x) \Delta \lambda - \Delta \pi_1 - \Delta \pi_2 = \nabla f(x) - \lambda^T \cdot \nabla h(x) - \pi_1 - \pi_2 \quad (4.17)$$

$$\nabla^T h(x) \cdot \Delta x = -h(x) \quad (4.18)$$

$$\Delta x - \Delta s_1 = -(x - s_1 - 1) \quad (4.19)$$

$$\Delta x + \Delta s_2 = -(x + s_2 - u) \quad (4.20)$$

$$-\Pi_1 \cdot \Delta s_1 - S_1 \cdot \Delta \pi_1 = -(\mu e - S_1 \pi_1) \quad (4.21)$$

$$\Pi_2 \cdot \Delta s_2 + S_2 \cdot \Delta \pi_2 = -(\mu e + S_2 \pi_2) \quad (4.22)$$

onde:

π_1 matriz diagonal de componentes π_{1i}

π_2 matriz diagonal de componentes π_{2i}

De (4.13) até (4.16) temos:

$$x - s_2 - 1 = 0 \quad (4.23)$$

$$x - s_2 - u = 0 \quad (4.24)$$

$$\mu e - S_1 \pi_1 = 0 \quad (4.25)$$

$$\mu e + S_2 \pi_2 = 0 \quad (4.26)$$

$$\pi_1 + \pi_2 = \mu \cdot (S_1^{-1} e - S_2^{-1} e) \quad (4.27)$$

Substituindo (4.23) e (4.24) em (4.19) e (4.20), respectivamente, obtemos:

$$\Delta s_1 = \Delta x \quad (4.28)$$

$$\Delta s_2 = -\Delta x \quad (4.29)$$

Substituindo (4.28) e (4.29) em (4.21) e (4.22), respectivamente, temos:

$$-\Pi_1 \cdot \Delta x - S_1 \cdot \Delta \pi_1 = -(\mu e - S_1 \pi_1) \quad (4.30)$$

$$-\Pi_2 \cdot \Delta x + S_2 \cdot \Delta \pi_2 = -(\mu e + S_2 \pi_2) \quad (4.31)$$

Reagrupando os termos para deixá-los em função de $\Delta \pi_1$ e $\Delta \pi_2$, tem-se

$$\Delta \pi_1 = S_1^{-1} \cdot (\mu e - S_1 \pi_1 - \Pi_1 \cdot \Delta x) \quad (4.32)$$

$$\Delta \pi_2 = S_2^{-1} \cdot (\mu e - S_2 \pi_2 - \Pi_2 \cdot \Delta x) \quad (4.33)$$

No entanto, se substituirmos as equações (4.25) e (4.26) nas equações (4.32) e (4.33), respectivamente, elas podem ser reescritas como:

$$\Delta \pi_1 = -S_1^{-1} \cdot \Pi_1 \cdot \Delta x \quad (4.34)$$

$$\Delta \pi_2 = -S_2^{-1} \cdot \Pi_2 \cdot \Delta x \quad (4.35)$$

Substituindo agora (4.45), (4.46) e (4.38) em (4.28) teremos:

$$\left[\nabla^2 f(x) - \lambda^T \cdot \nabla^2 h(x) \right] \Delta x - \nabla h(x) \cdot \Delta \lambda + S_1^{-1} \cdot \Pi_1 \cdot \Delta x - S_2^{-1} \cdot \Pi_2 \cdot \Delta x = \nabla f(x) - \lambda^T \nabla h(x) - \mu(S_1^{-1} e - S_2^{-1} e) \quad (4.36)$$

Reorganizando os termos dos conjuntos vistos acima, poderemos reescrever as equações (4.28) e (4.29) em função apenas das incógnitas Δx e $\Delta \lambda$.

$$\left[\nabla^2 f(x) - \lambda^T \cdot \nabla^2 h(x) + S_1^{-1} \Pi_1 - S_2^{-1} \Pi_2 \right] \Delta x - \nabla h(x) \cdot \Delta \lambda = \nabla f(x) - \lambda^T \nabla h(x) - \mu(S_1^{-1} e - S_2^{-1} e) \quad (4.37)$$

$$\nabla^T h(x) \cdot \Delta x = -h(x) \quad (4.38)$$

Colocando as equações (4.37) e (4.38) em uma estrutura matricial, obtém-se:

$$\begin{bmatrix} H & -J \\ -J^T & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z \\ h(x) \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

com:

$$H = \nabla^2 f(x) - \lambda^T \cdot \nabla^2 h(x) + S_1^{-1} \cdot \pi_1 - S_2^{-1} \cdot \pi_2$$

$$J = \nabla h(x)$$

$$Z = \nabla f(x) - \lambda^T \cdot \nabla h(x) - \mu \cdot (S_1^{-1} e - S_2^{-1} e)$$

Através da resolução do sistema (4.39), são obtidos $(\Delta x, \Delta \lambda)$. De posse dos valores destas variáveis, é possível determinar $(\Delta s_1, \Delta s_2)$ a partir de (4.39) e (4.40) bem como $(\Delta \pi_1, \Delta \pi_2)$ de (4.34) e (4.35).

4.4.3. Passo Primal-Dual

Como pode ser percebido no problema apresentado em (4.08), as variáveis contidas nesse problema são variáveis primais (x, s_1, s_2) e variáveis duais (λ, π_1, π_2) . Examinando individualmente os passos primal e dual, o incremento máximo até a barreira logarítmica será:

$$\alpha_P = \min \left[\min_{\Delta s_{1i} < 0} \frac{S_{1i}}{|\Delta S_{1i}|}, \min_{\Delta s_{2i} < 0} \frac{S_{2i}}{|\Delta S_{2i}|}, 1 \right] \quad (4.40)$$

$$\alpha_D = \min \left[\min_{\Delta \pi_{1i} < 0} \frac{\pi_{1i}}{|\Delta \pi_{1i}|}, \min_{\Delta \pi_{2i} < 0} \frac{\pi_{2i}}{|\Delta \pi_{2i}|}, 1 \right] \quad (4.41)$$

A atualização das variáveis primais e duais são obtidas através da determinação de α_P e α_D , como mostrado a seguir:

$$x = x + \sigma \cdot \alpha_P \cdot \Delta x \quad (4.42)$$

$$s_1 = s_1 + \sigma \cdot \alpha_P \cdot \Delta s_1 \quad (4.43)$$

$$s_2 = s_2 + \sigma \cdot \alpha_D \cdot \Delta s_2 \quad (4.44)$$

$$\lambda = \lambda + \sigma \cdot \alpha_D \cdot \Delta \lambda \quad (4.45)$$

$$\pi_1 = \pi_1 + \sigma \cdot \alpha_D \cdot \Delta \pi_1 \quad (4.46)$$

$$\pi_2 = \pi_2 + \sigma \cdot \alpha_D \cdot \Delta \pi_2 \quad (4.47)$$

O parâmetro $\sigma = 0,9995$, esse valor *default* é considerado de forma a evitar as singularidades da barreira logarítmica.

4.4.4. Atualização do Parâmetro Barreira

Um ponto que exige cuidado especial no algoritmo primal-dual é o controle do parâmetro de barreira μ . Devido a isso, a atualização do parâmetro barreira é feita em cada iteração, utilizando-se a seguinte equação:

$$\mu = \beta \frac{s_1^T \pi_1 - s_2^T \pi_2}{2n} \quad (4.48)$$

onde $\beta = 0,1$ e n é o número de variáveis primais do problema.

Como

$$\mu = \frac{gap}{\beta} \quad (4.49)$$

β é o valor divisor do "gap" cujo valor "default" no programa FLUPOT é igual a 10.0.

No programa **FLUPOT** o valor inicial "default" de μ é igual a 5.0. Este valor é utilizado para atribuir valores iniciais para as variáveis duais π_1 e π_2 .

Além disso, existe uma série de proteções no programa para resguardar e evitar problemas numéricos. Por exemplo, μ é sempre mantido maior ou igual a um valor mínimo $-\mu_{min}$ cujo valor "default" é de 5.0×10^{-4} , e as variáveis primais são sempre mantidas a uma distância de pelo menos ε da barreira. O valor de ε é alterado dinamicamente com μ . Seu valor inicial "default" é igual a 1.0×10^{-2} e o valor final 1.0×10^{-5} . Além disso se o valor de gap (4.48) se torna maior que um valor máximo cujo "default" é 1.0×10^4 o processo iterativo é interrompido, indicando que o problema é provavelmente inviável ou mal condicionado (CEPEL, 2000).

O algoritmo é considerado convergido quando as seguintes condições são satisfeitas:

- Máximo erro nas equações de balanço de potência ativa/reativa é menor que uma tolerância cujo valor "default" é 1.0MW/1.0MVar;

- Parâmetro de barreira é igual ao seu valor mínimo - μ_{\min} .
- Valor do gap é menor que uma dada tolerância cujo "default" é 5.5×10^{-4} .

As constantes/tolerâncias mencionadas acima podem ser alteradas via código no arquivo de entrada do programa.

4.5. Programa FLUPOT

O Programa FLUPOT tem a finalidade de calcular um estado de uma rede AC em regime permanente, otimizando uma função objetivo e satisfazendo uma série de restrições físicas e operacionais tanto no caso base como para as contingências.

Olhando por esse ponto, o FLUPOT é um programa de Fluxo de Potência Ótimo com Restrição de Segurança e para a sua execução o usuário deve determinar além dos dados da rede elétrica a função objetivo, relação de controles disponíveis, lista de contingências e restrições a serem consideradas na otimização.

4.5.1. Funções Objetivo

Quanto ao índice de desempenho a ser otimizado, várias são as opções disponíveis como descrito a seguir, e mais de uma opção pode ser especificada em uma dada execução do programa. A escolha da função objetivo deve ser feita criteriosamente de acordo com o estudo a ser conduzido. Mais adiante veremos a formulação matemática e descrição de cada função objetivo utilizada no estudo.

4.5.2. Custo de Geração de Potência Ativa

No programa o custo de geração é considerado como uma função linear passando pela origem. O FLUPOT em cada iteração calcula valores novos buscando minimizar o custo total de geração de potencia ativa, considerando todas as restrições definidas pelo usuário. Para o cálculo do custo de geração de potencia ativa temos:

$$f = \sum_{i \in I_G} c_{p_i} P G_i \quad (4.50)$$

onde:

IG é o conjunto de geradores de potência ativa controláveis,

c_{pi} é o custo de geração de potência ativa no gerador i ,

PG_i é a geração de potência ativa no gerador i .

4.5.3. Perdas

Para minimizar as perdas de potência ativa na rede, o programa ajusta os controles de reativo e normalmente usada mantendo-se o despacho de potência ativa fixo nas barras de geração (exceto na de referência) de maneira a minimizar as perdas elétricas. Os valores são calculados pela seguinte fórmula:

$$f = \sum_{(i,j) \in \Omega} (P_{ij} + P_{ji}) \quad (4.51)$$

onde:

P_{ij} é o fluxo de potência ativa da barra i para a barra j ,

P_{ji} é o fluxo de potência ativa da barra j para a barra i ,

Ω é o conjunto de circuitos na região de interesse.

Pode-se observar que na fórmula acima $(P_{ij}+P_{ji})$ são as perdas ativas no circuito (i,j) .

4.5.4. Controle de Tensão

Para o cálculo do Controle de Tensão, o programa especifica um ajuste nos controles de reativo com o objetivo de manter as tensões nos limites determinados pelo usuário. Caso não seja possível, os limites de tensão serão relaxados em um conjunto reduzido de barras escolhidas pelo programa sem a intervenção do usuário nessa decisão. Caso se faça necessário, pode-se indicar as barras em que não será permitida a relaxação dos seus respectivos limites de tensão.

O cálculo matemático desta função objetivo é análogo ao do Custo de Injeção de Potencia Reativa (item 4.6.5), exceto que se o somatório das injeções é maior que zero, limites de tensão serão relaxados até que o somatório torne-se zero. A tolerância de custo

reduzido para liberação de limites de tensão, o número de barras cujos limites de tensão podem ser liberados cada vez que a liberação é considerada e a tolerância do erro de potência ativa e reativa a partir da qual podem ocorrer liberação dos limites no processo iterativo são passíveis de alteração.

4.5.5. Custo de Geração de Potência Reativa

O custo total de geração de potência reativa é definido como uma função quadrática ou linear. Para a minimização do custo de Geração de Potencia Reativa devem ser especificados os pesos das funções quadráticas ou lineares de custo que podem ser diferenciados por cada gerador.

Para o caso de função quadrática esta opção pode ser usada no contexto de maximização da reserva de potência reativa (geração ou absorção) na rede. Para o caso de função linear ela pode ser usada no contexto de maximização da reserva de geração de potência reativa na rede.

- Função objetivo quadrática.

$$f = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i \in I_G} c_{qi} QG^2 \quad (4.52)$$

onde:

I_G é o conjunto de geradores de potência reativa controláveis ,

C_{qi} é o coeficiente da parábola de custo de geração de potência reativa do gerador i

QG_i é a geração de potência reativa na barra i

- Função objetivo Linear

$$f = \sum_{i \in I_G} c_{qi} QG$$

onde:

I_G é o conjunto de geradores de potência reativa controláveis ,

C_{qi} é o coeficiente da parábola de custo de geração de potência reativa do gerador i

QG_i é a geração de potência reativa na barra i

4.5.6. Máximo Carregamento

Esta função tem o objetivo de Maximizar a carga, mantendo o mesmo fator de potência, de um conjunto de barras da rede que deve ser definido previamente. Quando há mais de uma barra no conjunto, a direção de crescimento de carga pode ser fixada ou o programa pode determinar a direção ótima de crescimento. As barras cujas cargas devem ser maximizadas podem ser especificadas individualmente ou por área. A maximização de carga pode ser utilizada no contexto de colapso de tensão ou em estudos econômicos na determinação da máxima capacidade de atendimento de carga de um sistema de potência. A sua formulação matemática é:

$$f = \sum_{i \in \Omega} PL_i \quad (4.53)$$

onde:

Ω é o conjunto de barras que devem ter suas cargas maximizadas ,

PL_i é a carga na barra i .

4.5.7. Geração de Potência Ativa

Corresponde à geração de potência ativa nas barras geradoras cujo limite máximo de geração seja maior que o limite mínimo.

Se este controle não for ativado a geração de potência ativa nas barras PV, com exceção da barra de referência, será fixado no valor definido nos dados originais da rede. Na barra de referência a geração de potência ativa será automaticamente liberada (limite máximo/mínimo de geração potência ativa iguais a $\pm\infty$).

4.5.8. Tensão em Barra PV

A Tensão em Barra PV corresponde à tensão em usinas, compensadores síncronos ou estáticos cujo limite máximo de geração de potência reativa é maior que o limite mínimo.

Caso este controle não seja ativado, a tensão nas barras acima terá seu valor fixado durante a otimização, mas para que isso ocorra o limite de geração de potência reativa associada não poderá ter sido atingido.

No entanto, se isso ocorrer em uma determinada iteração, a tensão da barra correspondente é liberada e sua geração de potência reativa é fixada no limite alcançado. Essa é a lógica adotada nos programas de fluxo de potência em relação às barras PV.

4.6. Aspectos da Metodologia

4.6.1. Processos de Decomposição

No FLUPOT se usa um esquema subordinado em dois estágios onde se considera as várias conFigurações da rede (caso base e contingências) e o problema original é decomposto em:

- **subproblema de operação de caso base:** onde é otimizada a função objetivo e considerado as restrições operativas do caso base;
- **subproblema de operação para contingências:** onde a partir do ponto de operação fornecido pelo caso base se busca viabilizar a operação nas contingências.

A Figura 4.1 demonstra de forma sucinta o método de solução adotado para se resolver o problema de fluxo de potência ótimo com restrição de segurança. Nesta Figura, pode-se observar o fluxo de informações existente entre o *subproblema de operação de caso base* e os *subproblemas de operação de contingência*: o subproblema de operação de caso base envia às conFigurações de contingência uma proposta de ponto de operação e recebe informações a respeito da operação das contingências (estas informações indicam o grau de inviabilidade da operação de cada contingência). O processo iterativo

termina quando o ponto de operação do subproblema de operação de caso base permite a operação viável de todos os subproblemas de contingências. Os subproblemas do caso e contingências são resolvidos através da metodologia de pontos interiores.

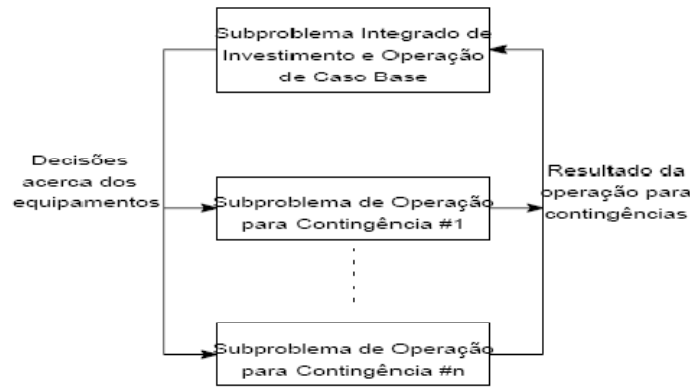


Figura 4.1 – Estrutura Hierárquica da Metodologia.

4.7. Conclusão

Neste capítulo foi descrita a formulação matemática do problema de Fluxo de Potência Ótimo (FPO) e também do método de otimização de Pontos Interiores. Se fez necessário também relatar a ferramenta computacional FLUPOT, que será usada nas análises e simulações do FPO dos sistemas de potência em regime permanente bem como sua metodologia.

Desde a sua proposição, há aproximadamente quatro décadas, o Fluxo de Potência Ótimo tem ganho uma importância cada vez maior, como ferramenta computacional de análise de sistemas de potência em regime permanente. A desregulamentação do mercado de energia elétrica acentuou esta importância, principalmente pelo caráter imparcial dos resultados que podem ser obtidos via FPO no ambiente desregulamentado.

5. ANÁLISE E APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

5.1. Introdução

Neste capítulo estão discriminados os resultados obtidos a partir dos estudos e análise do impacto da conexão da GD em um sistema real de subtransmissão de energia elétrica. Serão apresentados também os dados e as características do sistema elétrico considerado nos estudos.

O programa computacional utilizado para a realização das simulações denomina-se FLUPOT, uma plataforma desenvolvida pelo CEPEL e que integra os aplicativos do FPO em uma simulação rápida e completa. As análises foram realizadas considerando a instalação das gerações distribuídas nas barras 5523 e 5545 da rede e a barra 5525 sendo a barra de folga (BF) do sistema.

O FLUPOT adota como controle de tensão uma função objetivo que faz com que as injeções de reativo da GD e da BF sejam tais a compensar totalmente a carga indutiva e capacitiva. Com isso se reduz o fluxo de reativo na rede e em linhas onde a relação $\frac{X}{R}$ é maior que 1, significa que as variações de uma barra para outra são reduzidas e niveladas.

Obs.: Em redes de distribuição isso não se aplicaria, já que a relação $\frac{X}{R}$ é geralmente fracionária, implicando que as quedas de tensão são predominantemente causadas pelo fluxo de potência ativa.

5.2. Considerações Iniciais sobre o Sistema Estudado

O sistema estudado é uma pequena parte do sistema real de distribuição e subtransmissão que pertence à CELESC Distribuição S.A. na região do Meio-oeste do estado de Santa Catarina. Este sistema possui 34 barras e três níveis de tensão: 138, 69 e 24 (kV). Porém as simulações foram realizadas apenas para a região compreendida pelas barras 5523 (69 kV) e 5545 (24kV) onde foram interligadas as GD abrangendo as linhas de interligação até a barra 5525 (138 kV) que é a barra de referência do sistema (imposição de magnitude e ângulo da tensão terminal), e por isso a influência da GD no restante do

sistema não foi considerado. Na Figura 5.1 está representado o diagrama unifilar do sistema estudado.

Os estudos foram feitos com o perfil de tensão dentro do limite regulamentando pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a qual estabelece que a tensão contratada não pode variar mais do que 5% ($0,95 \text{ p.u.} \leq \text{tensão} \leq 1,05 \text{ p.u.}$), que foi uma restrição operativa imposta na configuração do programa FLUPOT.

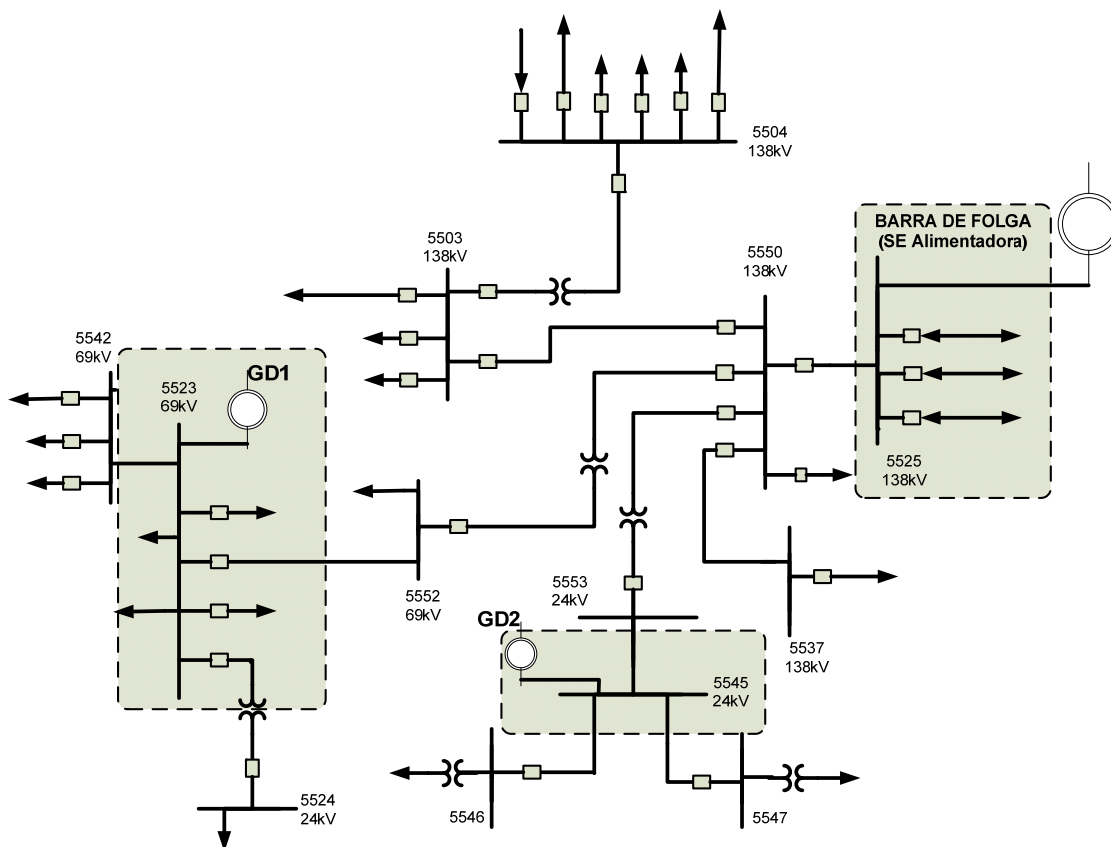


Figura 5.1 – Diagrama da área do sistema de subtransmissão estudado

Um estudo abrangente sobre os impactos da GD nos sistemas de potência deve levar em consideração diferentes cenários de operação. No entanto, apenas os casos mais críticos precisam ser analisados detalhadamente, pois dessa maneira os casos intermediários estarão contemplados. A sustentação para essa conclusão baseia-se na idéia que se um determinado critério técnico é garantido para as situações extremas qualquer situação intermediária estará automaticamente satisfeita (Masters, 2001). Considerando o

custo de geração, perfil de tensão da rede, as perdas e o máximo carregamento, foram analisados para os seguintes cenários:

- ✓ Máximo carregamento do sistema sem GD;
- ✓ Máximo carregamento do sistema com 1 GD;
- ✓ Máxima geração de Potência Ativa do sistema com 1 GD;
- ✓ Máximo carregamento do sistema com 2 GD;
- ✓ Máxima geração de Potência Ativa do sistema com 2 GD;
- ✓ Carregamento original do sistema com análise do custo de geração, perfil de tensão, e perdas;
- ✓ Carregamento original do sistema +10% com análise do custo de geração, perfil de tensão e perdas;
- ✓ Carregamento original do sistema +20% com análise do custo de geração, perfil de tensão e perdas.

5.3. Análise de Maximização da Geração do Sistema

Nessa simulação buscou-se maximizar a geração da potencia ativa otimizando o custo das gerações para diversos cenários de carga. Foram definidos custos diferentes para os suprimentos de potencia da Barra de Folga (SE Alimentadora) e para GD, de forma a priorizar o despacho dos geradores distribuídos. As simulações foram realizadas para os três cenários de carga estudados nesse trabalho e citadas anteriormente.

5.3.1. Maximização da Potência Ativa Gerada com 1GD

Nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 estão os resultados das gerações com a interligação de uma GD na barra 5523 destacada nas Tabelas e ainda os valores das tensões das barras do sistema.

Tabela 5.1 – Cálculo da maximização da potência ativa carga inicial.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CGMW	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	1,028	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	0,984	0,0	0,0	23,7	10,8
5523	1,021	62,3	-7,4	0,0	0,0
5524	1,050	0,0	0,0	7,8	1,5
5525*	1,030	16,5	-7,9	0,0	0,0
5537	1,029	0,0	0,0	9,5	2,4
5542	1,021	0,0	0,0	7,5	2,8
5545	0,991	0,0	0,0	0,0	0,0
5546	1,027	0,2	0,0	1,5	0,5
5547	1,026	0,3	0,0	1,6	0,6
5550	1,030	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	0,950	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	1,049	0,0	0,0	23,5	6,9

Tabela 5.2 – Cálculo da maximização da Potência Ativa carga acrescida de 10%.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CGMW	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	1,029	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	0,983	0,0	0,0	26,1	11,9
5523	1,021	63,9	-6,7	0,0	0,0
5524	1,050	0,0	0,0	8,6	1,7
5525*	1,036	22,8	-5,3	0,0	0,0
5537	1,032	0,0	0,0	10,5	2,6
5542	1,021	0,0	0,0	8,3	3,1
5545	0,983	0,0	0,0	0,0	0,0
5546	1,007	0,2	0,0	1,7	0,6
5547	1,004	0,3	0,0	1,8	0,7
5550	1,032	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	0,951	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	1,049	0,0	0,0	25,9	7,6

Tabela 5.3 – Cálculo da maximização da Potência Ativa carga acrescida de 20%.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CGMW	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	1,028	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	0,982	0,0	0,0	28,4	13,0
5523	1,022	65,4	-6,2	0,0	0,0
5524	1,050	0,0	0,0	9,4	1,8
5525*	1,039	28,6	-2,4	0,0	0,0
5537	1,033	0,0	0,0	11,4	2,9
5542	1,022	0,0	0,0	9,0	3,4
5545	0,979	0,0	0,0	0,0	0,0
5546	1,004	0,2	0,0	1,8	0,6
5547	1,002	0,3	0,0	1,9	0,7
5550	1,033	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	0,951	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	1,049	0,0	0,0	28,2	8,3

Os dados dos perfis de tensão para as simulações de maximização da geração de potência ativa são ilustrados na Figura 5.2 e demonstram que as limitações de geração são conseqüências dos limites de tensão superior e inferior nas barras 5524, 5552 e 5553.

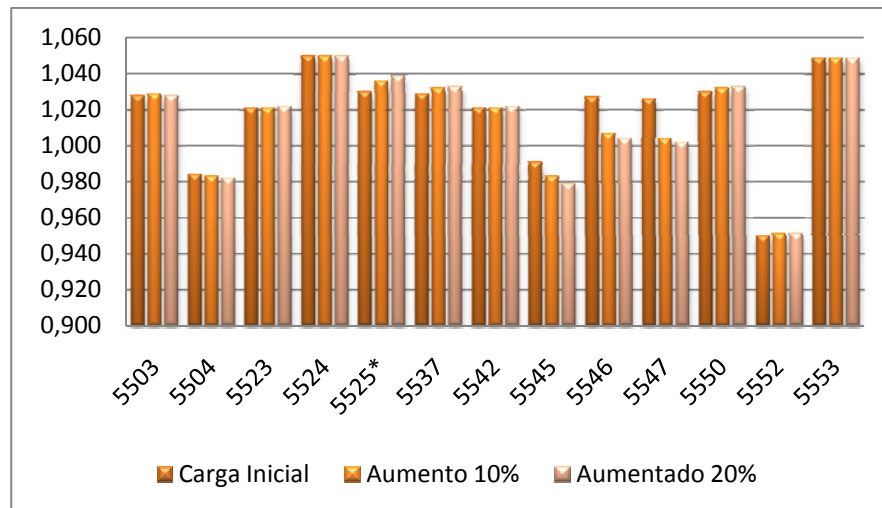


Figura 5.2 – Perfil de Tensão devido a Maximização da Potência Ativa gerada – 1GD.

5.3.2. Maximização da Potência Ativa Gerada com 2GD

Foi repetida a análise, porém para a situação de se ter duas GD conectadas à rede.

Tabela 5.4 – Cálculo da maximização da Potência Ativa carga inicia.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CGMW	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	1,008	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	0,966	0,0	0,0	23,7	10,8
5523	1,021	62,3	-7,4	0,0	0,0
5524	1,050	0,0	0,0	7,8	1,5
5525*	1,012	10,0	-5,5	0,0	0,0
5537	1,011	0,0	0,0	9,5	2,4
5542	1,021	0,0	0,0	7,5	2,8
5545	1,049	7,1	1,4	0,0	0,0
5546	1,048	0,0	0,0	1,5	0,5
5547	1,039	0,0	0,0	1,6	0,6
5550	1,011	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	0,950	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	0,968	0,0	0,0	23,5	6,9

Tabela 5.5 – Cálculo da maximização da Potência Ativa carga acrescida de 10%.

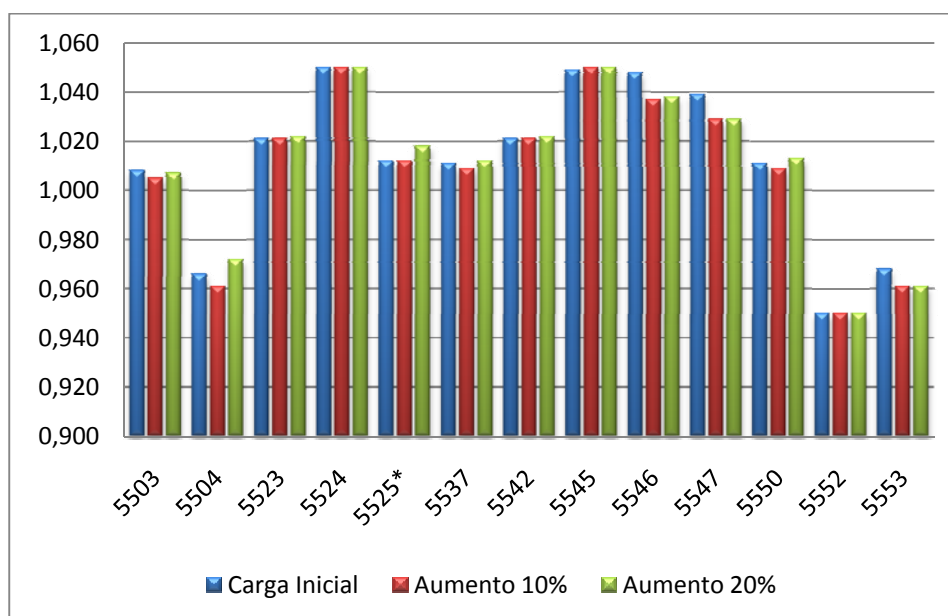
IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CGMW	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	1,005	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	0,961	0,0	0,0	26,1	11,9
5523	1,021	63,9	-6,6	0,0	0,0
5524	1,050	0,0	0,0	8,6	1,7
5525*	1,012	15,5	-2,6	0,0	0,0
5537	1,009	0,0	0,0	10,5	2,6
5542	1,021	0,0	0,0	8,3	3,1
5545	1,050	7,9	1,7	0,0	0,0
5546	1,037	0,0	0,0	1,7	0,6
5547	1,029	0,0	0,0	1,8	0,7
5550	1,009	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	0,950	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	0,961	0,0	0,0	25,9	7,6

Tabela 5.6 – Cálculo da maximização da Potência Ativa carga acrescida de 20%.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CGMW	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	1,007	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	0,972	0,0	0,0	28,4	13,0
5523	1,022	65,4	-6,0	0,0	0,0
5524	1,050	0,0	0,0	9,4	1,8
5525*	1,018	21,1	-0,3	0,0	0,0
5537	1,012	0,0	0,0	11,4	2,9
5542	1,022	0,0	0,0	9,0	3,4
5545	1,050	8,1	1,7	0,0	0,0
5546	1,038	0,0	0,0	1,8	0,6
5547	1,029	0,0	0,0	1,9	0,7
5550	1,013	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	0,950	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	0,961	0,0	0,0	28,2	8,3

Tal simulação comprovou a prioridade de despacho e suprimento das cargas pelas GD, visto que com a inserção da nova GD o valor gerado pela barra de folga foi diminuído e alocado a geração na nova GD. Estas informações estão expostas nas Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6 que também descrevem os perfis de tensão de cada cenário.

Os dados dos perfis de tensão mostrado na Figura 5.3 abaixo, nos relata que houve uma alteração nos valores das tensões nas barras com uma leve melhora no perfil do caso onde temos as duas GD conectadas na rede.

**Figura 5.3** – Perfil de Tensão devido a Maximização da Potência Ativa gerada – 2GD.

5.4. Análise de Maximização do Carregamento do Sistema

Essa simulação tem como objetivo verificar o comportamento do sistema de energia elétrica em regime permanente perante a maximização das cargas sem a presença da GD e com a GD conectada.

Durante as simulações as GD são definidas como sendo prioritárias no despacho da geração e foi liberado a potência ativa dessas gerações para que fosse encontrado o ótimo pelo programa do FPO.

As Tabela 5.1, 5.3 e 5.5 mostra os resultados do cálculo do FPO para os três casos analisados: sem GD, 1GD e 2GD. A barra 5525 é a barra de folga do sistema e as barras destacadas 5523 e 5545 são as barras de conexão das GD.

Será visto que nos perfis de tensão de alguns casos analisados teremos valores altos em algumas barras da rede, isso se deve ao efeito dos campos capacitivos.

5.4.1. Maximização da Carga sem GD

As simulações sem a interligação da GD se fizeram necessário para comparação dos resultados em diferentes cenários e também por ser o ponto inicial dos estudos de maneira a dar coesão nas conclusões e visam maximizar as cargas dentro das restrições impostas.

Tabela 5.7 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo maximizando as cargas - Sem GD.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CMXC	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	1,011	0,00	0,0	0,0	0,0
5504	1,026	0,00	0,0	37,7	17,2
5523	1,009	0,00	0,0	0,0	0,0
5524	1,035	0,00	0,0	12,4	2,4
5525*	1,048	121,60	3,9	0,0	0,0
5537	1,022	0,00	0,0	15,1	3,8
5542	1,009	0,00	0,0	11,9	4,5
5545	0,980	0,00	0,0	0,0	0,0
5546	1,012	0,20	0,0	1,5	0,0
5547	1,012	0,30	0,0	1,6	0,0
5550	1,022	0,00	0,0	0,0	0,0
5552	1,047	0,00	0,0	0,0	0,0
5553	1,038	0,00	0,0	37,4	11,0

* Barra Referência para resolução das equações do Fluxo de Potência

Tabela 5.8 – Maximização da carga sem GD.

Maximização	MW	Mvar
CARGA INICIAL	75,1	25,5
GERACAO TOTAL	122,1	3,9
PERDA TOTAL	4,5	11,1
AUMENTO CARGA	42,5	14,4

5.4.2. Maximização da Carga com 1GD

Tabela 5.9 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo maximizando as cargas - 1 GD.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CMXC	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	0,974	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	1,050	0,0	0,0	51,2	23,3
5523	0,998	65,1	-15,9	0,0	0,0
5524	1,019	0,0	0,0	16,9	3,2
5525*	1,037	91,7	38,7	0,0	0,0
5537	0,997	0,0	0,0	20,5	5,2
5542	0,998	0,0	0,0	16,2	6,0
5545	0,979	0,0	0,0	0,0	0,0
5546	0,972	0,2	0,0	1,5	0,5
5547	0,964	0,3	0,0	1,6	0,6
5550	0,998	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	0,989	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	1,043	0,0	0,0	44,1	12,5

* Barra Referência para resolução das equações do Fluxo de Potência

Tabela 5.10 – Maximização da carga com 1GD.

Maximização 1 GD	MW	Mvar
CARGA INICIAL	75,1	25,5
GERACAO TOTAL	157,8	25,9
PERDA TOTAL	5,5	19,5
AUMENTO CARGA	77,29	26,19

5.4.3. Maximização da Carga com 2GD

Tabela 5.11 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo maximizando as cargas - 2 GD.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CMXC	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	0,977	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	1,050	0,0	0,0	51,8	23,6
5523	0,992	63,8	-20,7	0,0	0,0
5524	1,013	0,0	0,0	17,0	3,3
5525*	1,048	96,8	52,9	0,0	0,0
5537	1,000	0,0	0,0	20,8	5,2
5542	0,992	0,0	0,0	16,4	6,1
5545	1,017	5,1	-2,0	0,0	0,0
5546	1,013	0,2	0,0	1,5	0,5
5547	1,005	0,3	0,0	1,6	0,6
5550	1,001	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	0,999	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	0,982	0,0	0,0	51,3	15,1

* Barra Referência para resolução das equações do Fluxo de Potência

Tabela 5.12 – Maximização da carga com 2 GD.

Maximização 2 GD	MW	Mvar
CARGA INICIAL	75,1	25,5
GERACAO TOTAL	166,3	30,2
PERDA TOTAL	5,9	20,7
AUMENTO CARGA	85,31	28,91

As Tabelas 5.2, 5.4 e 5.6 mostram a injeção de potência ativa e reativa, as perdas e os carregamentos para o sistema estudado. A carga inicial é o ponto de partida do sistema e o aumento de carga é o valor máximo de incremento do carregamento do sistema, sendo o ponto ótimo encontrado através da simulação. Pode ser observado que houve um ganho considerável na carga total do sistema com a conexão da GD que teve seu valor aumentado em aproximadamente 100%. A geração necessária de potência ativa e reativa provem da barra de folga e da(s) GD.

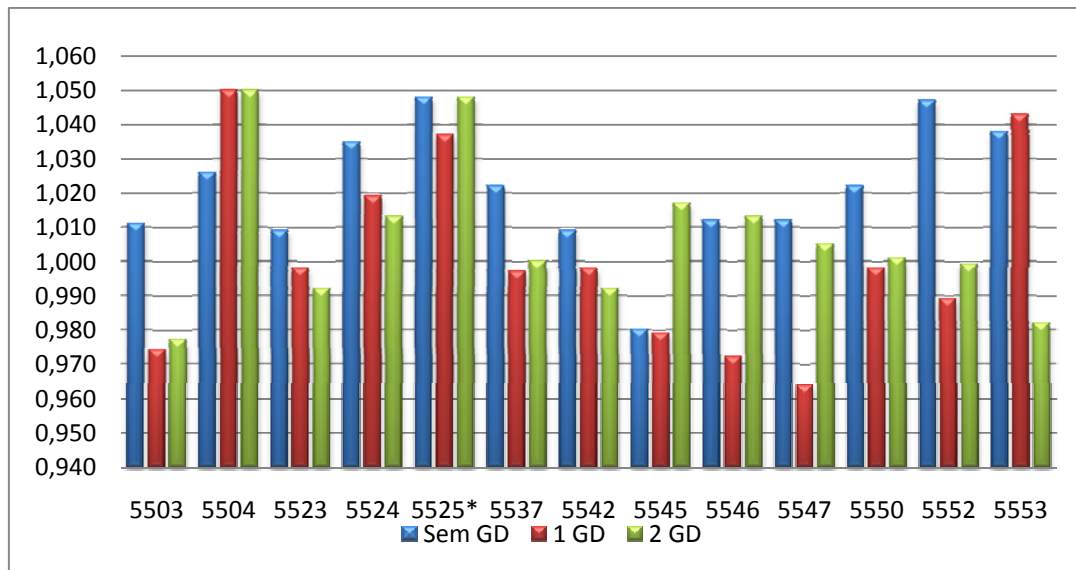


Figura 5.4 – Perfil de Tensão devido a Maximização do carregamento

Analisando os resultados da Figura 5.2, percebemos uma melhora no desempenho do sistema, principalmente para o cenário com 2GD. A interligação da GD não acarretou problemas de tensão, pelo contrario, ocasionou uma melhora no perfil de tensão aproximando os valores da maioria das barras a 1pu.

Os valores máximos de acréscimo suportado por barra de carga para cada cenário analisado é mostrado na Figura 5.3, sendo proporcional aos valores da carga inicial.

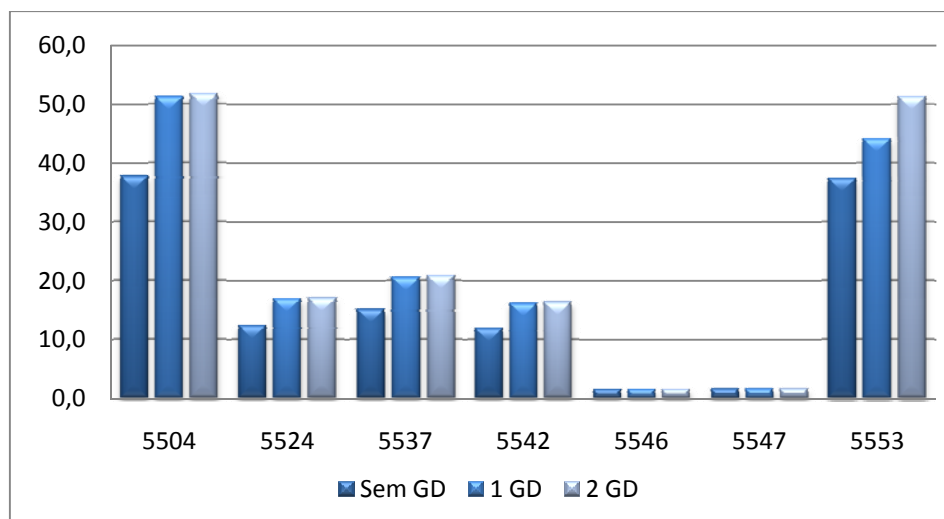


Figura 5.5 – Maximização do carregamento

Nota-se na Figura acima os baixos valores das cargas nas barras 5546 e 5547, elas ocorrem por serem de pequenas linhas secundárias do transformador (Rede Rural de Distribuição) com valores abaixo dos possíveis de interpretação pelo FLUPOT.

A Figura 5.4 ilustra graficamente os dados expostos pelas Tabelas 5.2, 5.4 e 5.6 que relata o aumento de carga suportado pelo sistema até o limite de tensão. É mostrado também os valores máximos de geração e perdas alcançados.

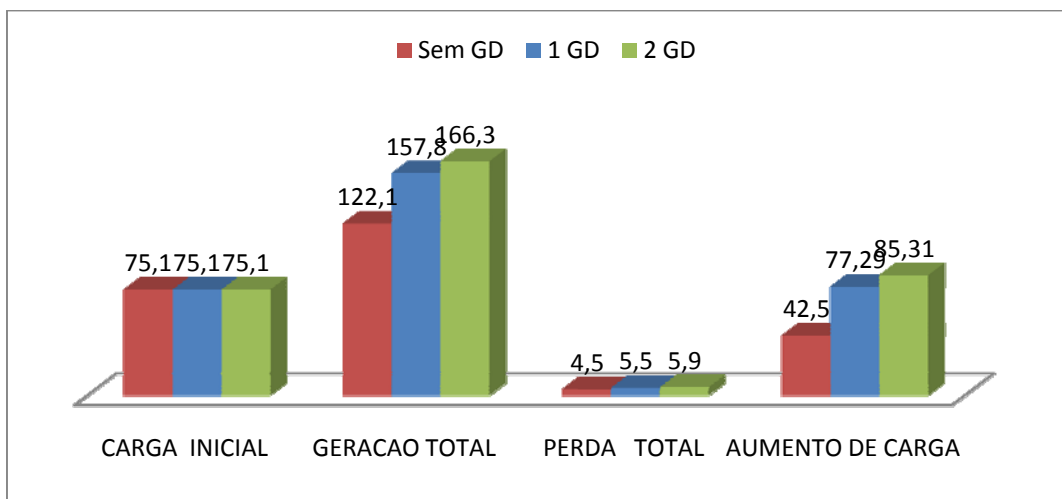


Figura 5.6 – Incrementos suportados pelo sistema em cada cenário

5.5. Análise através das Perdas.

A análise de minimização das perdas trata de verificar quais influências a conexão de geração distribuída têm sobre as perdas do sistema na região da GD. Para tanto, foram calculadas as perdas antes e depois da conexão da GD e os resultados são apresentados nas Tabelas 5.7 a 5.16.

Para se chegar ao ponto ótimo de minimização das perdas, é utilizado o incremento das gerações ativas e reativas da rede. Nos casos onde não existem GD conectada esse incremento é feito apenas na barra de folga.

5.5.1. Minimização das Perdas sem GD

Abaixo são descritos os valores alcançados com a solução do FPO para a minimização das perdas na ausência da GD. Os dados estão nas Tabelas 5.7, 5.8 e 5.9.

Tabela 5.13 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo otimizando as perdas elétricas - Sem GD- Inicial.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CARGA INICIAL	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	1,000	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	1,012	0,0	0,0	23,7	10,8
5523	0,995	0,0	0,0	0,0	0,0
5524	1,023	0,0	0,0	7,8	1,5
5525*	1,007	76,9	-19,5	0,0	0,0
5537	1,001	0,0	0,0	9,5	2,4
5542	0,994	0,0	0,0	7,5	2,8
5545	0,971	0,0	0,0	0,0	0,0
5546	1,002	0,1	0,0	1,5	0,0
5547	1,001	0,2	0,0	1,6	0,0
5550	1,001	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	1,009	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	1,034	0,0	0,0	23,5	6,9

Tabela 5.14 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo otimizando as perdas - Sem GD - 10%.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		AUMENTO DE 10%	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	1,004	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	1,015	0,0	0,0	26,1	11,9
5523	0,992	0,0	0,0	0,0	0,0
5524	1,019	0,0	0,0	8,6	1,7
5525*	1,020	84,9	-15,1	0,0	0,0
5537	1,006	0,0	0,0	10,5	2,6
5542	0,991	0,0	0,0	8,3	3,1
5545	0,975	0,0	0,0	0,0	0,0
5546	0,957	0,2	0,0	1,7	0,6
5547	0,950	0,3	0,0	1,8	0,7
5550	1,007	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	1,024	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	1,050	0,0	0,0	25,9	7,6

Tabela 5.15 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo otimizando as perdas - Sem GD - 20%.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		AUMENTO DE 20%	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	1,004	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	1,015	0,0	0,0	28,4	13,0
5523	0,992	0,0	0,0	0,0	0,0
5524	1,019	0,0	0,0	9,4	1,8
5525*	1,025	92,5	-10,9	0,0	0,0
5537	1,009	0,0	0,0	11,4	2,9
5542	0,992	0,0	0,0	9,0	3,4
5545	0,970	0,0	0,0	0,0	0,0
5546	0,951	0,2	0,0	1,8	0,6
5547	0,950	0,3	0,0	1,9	0,7
5550	1,009	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	1,026	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	1,050	0,0	0,0	28,2	8,3

Tabela 5.16 – Minimização das perdas elétricas - Sem GD.

<i>Perdas Sem GD</i>	inicial		10% Aumento carga		20% Aumento carga	
	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar
CARGA INICIAL	75,1	24,4	82,9	28,2	90,1	30,7
GERACAO TOTAL*	77,2	-19,5	85,4	-15,0	93,0	-11,0
PERDA TOTAL	2,1	1,2	2,5	2,4	2,9	4,0

* A Geração Total nessa simulação corresponde ao suprimento via barra de folga.

A Figura 5.5 ilustra o perfil de tensão para solução do caso base sem GD e que servirá de ponto de partida para análise dos resultados com a presença da GD no sistema.

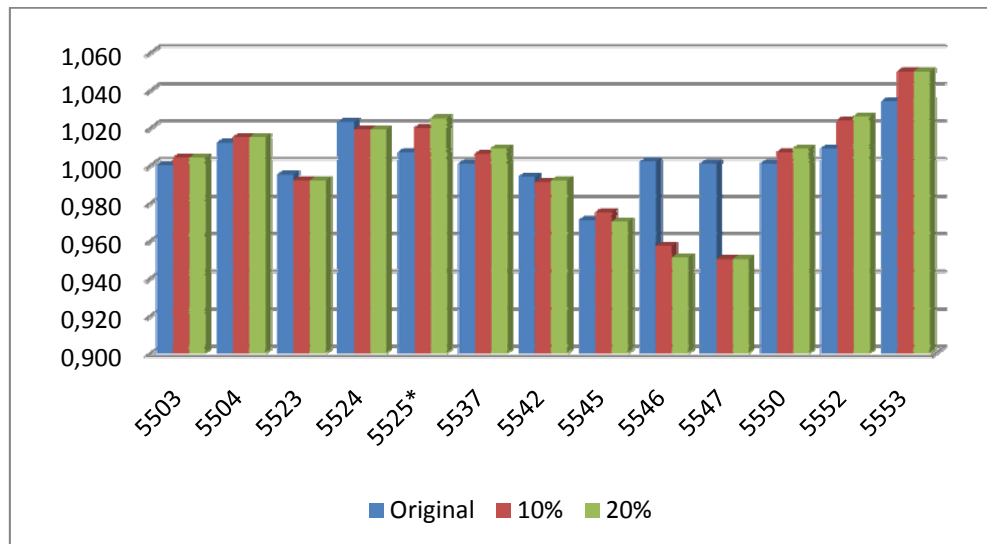


Figura 5.7 – Perfil de tensão com o controle das perdas sem GD

5.5.2. Minimização das Perdas com 1GD

As simulações dos casos com interligação de 1GD nos forneceram os dados que se seguem nas Tabelas 5.11 a 5.14:

Tabela 5.17 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 1 GD com carga inicial.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CARGA	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	0,995	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	1,012	0,0	0,0	23,7	10,8
5523	0,997	21,7	-8,1	0,0	0,0
5524	1,025	0,0	0,0	7,8	1,5
5525*	1,002	54,2	-13,2	0,0	0,0
5537	0,996	0,0	0,0	9,5	2,4
5542	0,997	0,0	0,0	7,5	2,8
5545	0,977	0,0	0,0	0,0	0,0
5546	0,970	0,1	0,0	1,5	0,5
5547	0,961	0,2	0,0	1,6	0,6
5550	0,997	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	0,993	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	1,045	0,0	0,0	23,5	6,9

Tabela 5.18 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 1 GD com incremento na carga de 10%.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CARGA - 10%	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	0,996	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	1,012	0,0	0,0	26,1	11,9
5523	0,998	23,8	-7,3	0,0	0,0
5524	1,026	0,0	0,0	8,6	1,7
5525*	1,007	59,9	-10,3	0,0	0,0
5537	0,999	0,0	0,0	10,5	2,6
5542	0,998	0,0	0,0	8,3	3,1
5545	0,975	0,0	0,0	0,0	0,0
5546	0,957	0,2	0,0	1,7	0,6
5547	0,950	0,3	0,0	1,8	0,7
5550	0,999	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	0,992	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	1,050	0,0	0,0	25,9	7,6

Tabela 5.19 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 1 GD com incremento na carga de 20%.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CARGA - 20%	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	0,996	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	1,012	0,0	0,0	28,4	13,0
5523	0,999	25,9	-6,7	0,0	0,0
5524	1,026	0,0	0,0	9,4	1,8
5525*	1,012	65,3	-7,4	0,0	0,0
5537	1,001	0,0	0,0	11,4	2,9
5542	0,999	0,0	0,0	9,0	3,4
5545	0,970	0,0	0,0	0,0	0,0
5546	0,951	0,2	0,0	1,8	0,6
5547	0,950	0,3	0,0	1,9	0,7
5550	1,001	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	0,992	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	1,050	0,0	0,0	28,2	8,3

Nas Tabelas acima, a barra selecionada (5523) indica o ponto de conexão da GD. Na Tabela 5.14 temos os resultados das simulações para os três casos analisados, sendo de carga inicial e de carga aumentada em 10% e 20%, e que serão comentados posteriormente em comparação com demais resultados.

Tabela 5.20 – Minimização das Perdas elétricas na presença de 1 GD.

Perdas 1 GD	Original		10% Aumento carga		20% Aumento carga	
	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar
CARGA INICIAL	75,1	25,5	82,9	28,2	90,1	30,7
GERACAO TOTAL	76,2	-21,3	84,3	-17,6	91,7	-14,1
PERDA TOTAL	1,1	-1,3	1,4	-0,2	1,6	0,9

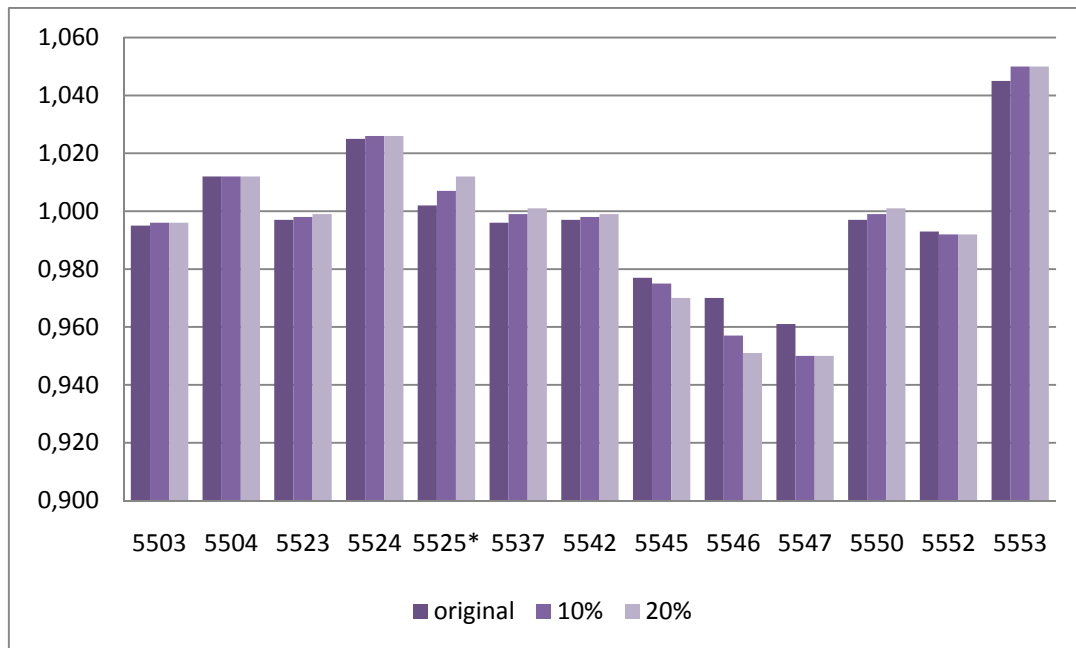


Figura 5.8 – Perfil de tensão com o controle das perdas – 1GD

5.5.3. Minimização das Perdas com 2GD

Este caso tem a conexão da GD em dois pontos do sistema, que são nas barras 5523 e 5545 destacadas nas Tabelas 5.16, 5.17 e 5.18. Nestas Tabelas podemos encontrar os valores das gerações de cada gerador e da barra de folga bem como as variações nos perfis de tensão.

Tabela 5.21 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 2 GD com carga inicial.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CARGA	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	0,991	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	1,011	0,0	0,0	23,7	10,8
5523	0,997	21,3	-8,0	0,0	0,0
5524	1,025	0,0	0,0	7,8	1,5
5525*	0,997	51,1	-13,6	0,0	0,0
5537	0,992	0,0	0,0	9,5	2,4
5542	0,997	0,0	0,0	7,5	2,8
5545	1,012	3,5	1,2	0,0	0,0
5546	1,007	0,0	0,0	1,5	0,5
5547	0,998	0,0	0,0	1,6	0,6
5550	0,992	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	0,993	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	1,004	0,0	0,0	23,5	6,9

Tabela 5.22 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 2 GD com incremento na carga de 10%.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CARGA - 10%	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	0,991	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	1,010	0,0	0,0	26,1	11,9
5523	0,997	23,4	-7,4	0,0	0,0
5524	1,025	0,0	0,0	8,6	1,7
5525*	1,001	56,5	-11,0	0,0	0,0
5537	0,994	0,0	0,0	10,5	2,6
5542	0,997	0,0	0,0	8,3	3,1
5545	1,017	4,0	1,6	0,0	0,0
5546	1,002	0,0	0,0	1,7	0,6
5547	0,993	0,0	0,0	1,8	0,7
5550	0,994	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	0,992	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	1,007	0,0	0,0	25,9	7,6

Tabela 5.23 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 2 GD com incremento na carga de 20%.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CARGA - 20%	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	0,991	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	1,010	0,0	0,0	28,4	13,0
5523	0,998	25,4	-6,7	0,0	0,0
5524	1,026	0,0	0,0	9,4	1,8
5525*	1,006	61,6	-8,2	0,0	0,0
5537	0,996	0,0	0,0	11,4	2,9
5542	0,998	0,0	0,0	9,0	3,4
5545	1,017	4,2	1,7	0,0	0,0
5546	1,002	0,0	0,0	1,8	0,6
5547	0,993	0,0	0,0	1,9	0,7
5550	0,996	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	0,991	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	1,007	0	0	28,2	8,3

Tabela 5.24 – Cálculo das perdas elétricas com a presença de 2 GD.

Perdas 2 GD	Original		10% Aumento carga		20% Aumento carga	
	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar
CARGA INICIAL	75,1	25,5	82,9	28,2	90,1	30,7
GERACAO TOTAL	76,0	-20,4	83,9	-16,7	91,3	-13,2
PERDA TOTAL	0,9	-1,7	1	-0,7	1,2	0,4

A interligação da GD ao sistema, fez com que as perdas ativas e reativas diminuíssem em aproximadamente 40% na região da GD, vide Tabela 5.10, Tabela 5.14 e Tabela 5.18. Os valores percentuais calculados relacionam-se as perdas observadas nos casos sem GD e com GD conectada.

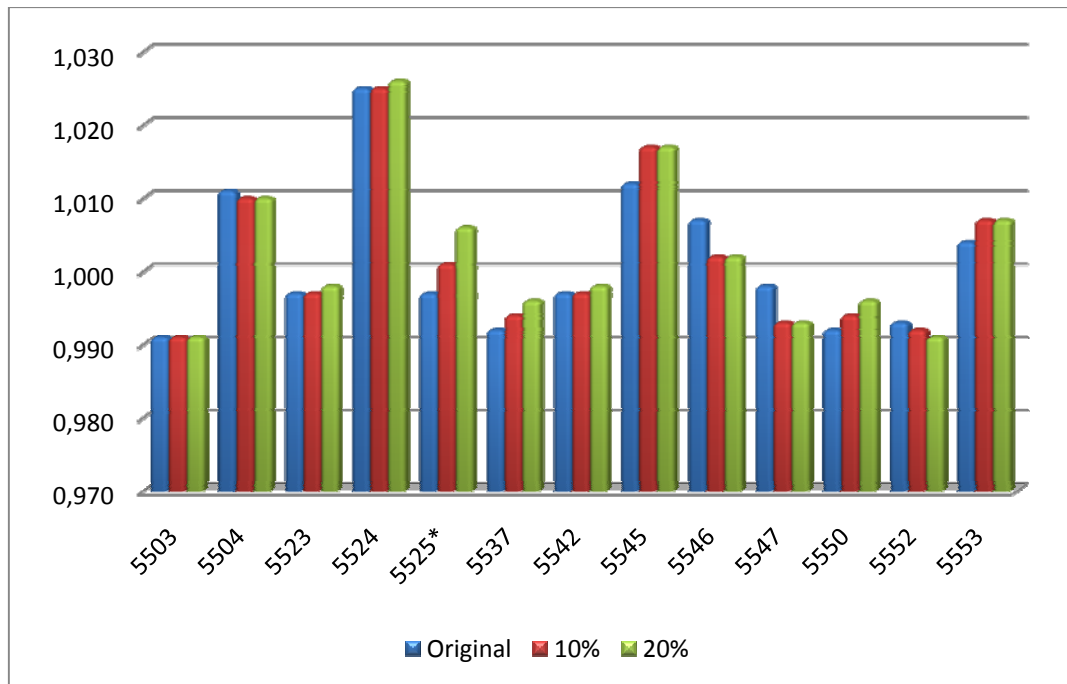


Figura 5.9 – Perfil de tensão com o controle das perdas – 2GD

Analisando os gráficos das Figura 5.4, Figura 5.5 e Figura 5.6 percebemos que a GD influenciou de forma positiva no perfil de tensão, fazendo com que se tivesse um grande numero de barras do sistema operando próximas a 1pu, na região da GD fazendo com que o sistema opere com uma relativa folga.

5.6. Análise através do Controle de Tensão.

5.6.1. Otimização com Controle de Tensão sem GD

Esta simulação tem a finalidade de observar quais os impactos que a conexão da GD pode causar no sistema analisado pela otimização do perfil de tensão. Os resultados são apresentados nas Tabelas 5.19 a 5.30.

Tabela 5.25 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo otimizando o C. de Tensão - Sem GD.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CARGA	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	0,986	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	1,006	0,0	0,0	23,7	20,6
5523	0,991	0,0	0,0	0,0	0,0
5524	1,004	0,0	0,0	7,8	6,1
5525*	1,012	76,8	1,8	0,0	0,0
5537	0,994	0,0	0,0	9,5	2,4
5542	0,991	0,0	0,0	7,5	2,8
5545	0,969	0,0	0,0	0,0	0,0
5546	0,999	0,1	0,0	1,5	0,0
5547	0,999	0,2	0,0	1,6	0,0
5550	0,995	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	1,018	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	1,033	0,0	0,0	23,5	14,0

Tabela 5.26 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo otimizando - Sem GD - 10%.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CARGA - 10%	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	0,985	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	1,006	0,0	0,0	26,1	21,4
5523	0,995	0,0	4,8	0,0	0,0
5524	1,006	0,0	0,0	8,6	6,7
5525*	1,015	84,9	1,7	0,0	0,0
5537	0,996	0,0	0,0	10,5	2,6
5542	0,995	0,0	0,0	8,3	3,1
5545	0,975	0,0	0,0	0,0	0,0
5546	0,957	0,2	0,0	1,7	0,6
5547	0,950	0,3	0,0	1,8	0,7
5550	0,996	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	1,014	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	1,050	0,0	0,0	25,9	14,2

Na análise dos dados nota-se que não houve mudança significativa no comportamento do sistema, o que já se esperava pois neste momento ainda não temos a presença da GD na rede. Houve apenas o aumento da carga em cada simulação e a variável de controle nesse caso é apenas a barra de folga, mas o interesse nesta situação era exatamente de se obter parâmetros para comparações com os casos com inserção de GD.

Vale a pena ressaltar que a única discrepância nos resultados são as tensões nas barras 5546 e 5547, mas isso se deve ao fato de serem cargas secundárias ao transformador e de valores bem pequenos que não podem ser interpretadas pelo FLUPOT, como já comentado anteriormente. No gráfico da Figura 5.8 podemos confirmar o comentado.

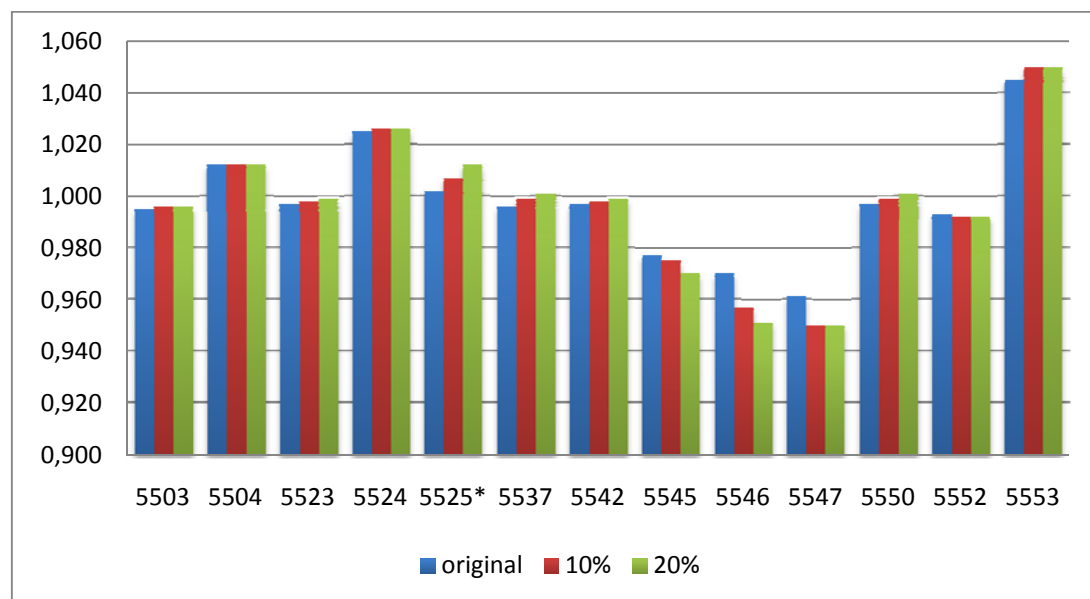
Tabela 5.27 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo otimizando o C. de Tensão - Sem GD - 20%.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CARGA - 20%	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	0,984	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	1,005	0,0	0,0	28,4	22,2
5523	0,995	0,0	6,3	0,0	0,0
5524	1,006	0,0	0,0	9,4	6,8
5525*	1,018	92,6	4,1	0,0	0,0
5537	0,996	0,0	0,0	11,4	2,9
5542	0,995	0,0	0,0	9,0	3,4
5545	0,970	0,0	0,0	0,0	0,0
5546	0,951	0,2	0,0	1,8	0,6
5547	0,950	0,3	0,0	1,9	0,7
5550	0,996	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	1,015	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	1,050	0	0	28,2	14,8

Tabela 5.28 – Otimização da carga com Controle de Tensão – sem GD.

<i>C. Tensão Sem GD</i>	Original		10% Aumento carga		20% Aumento carga	
	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar
CARGA INICIAL	75,1	24,4	82,9	28,2	90,1	30,7
GERACAO TOTAL*	77,1	1,8	85,4	6,5	93,1	10,5
PERDA TOTAL	2,0	0,4	2,5	2,2	3,0	4,1

* A Geração Total nessa simulação corresponde ao suprimento via barra de folga.

**Figura 5.10** – Perfil de tensão com o controle de tensão – sem GD

5.6.2. Otimização com Controle de Tensão com 1GD

A fim de ampliar a base de dados de resultados, foram feitas simulações onde o objetivo era de verificar a reação do sistema perante a conexão da GD, tendo como

objetivo de otimização o controle da tensão. Os resultados obtidos estão descritos nas Tabelas 5.23 a 5.30:

Tabela 5.29 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 1GD com carga inicial.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CARGA	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	0,987	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	1,007	0,0	0,0	23,7	20,6
5523	0,997	44,0	-18,0	0,0	0,0
5524	1,009	0,0	0,0	7,8	6,6
5525*	1,016	33,6	22,1	0,0	0,0
5537	0,996	0,0	0,0	9,5	2,4
5542	0,997	0,0	0,0	7,5	2,8
5545	0,977	0,0	0,0	0,0	0,0
5546	0,969	0,1	0,0	1,5	0,5
5547	0,960	0,2	0,0	1,6	0,6
5550	0,996	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	0,998	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	1,045	0,0	0,0	23,5	13,7

Tabela 5.30 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 1GD com incremento na carga de 20%.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CARGA - 10%	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	0,986			0,0	0,0
5504	1,006			26,1	21,4
5523	0,998	51,2	-19,4	0,0	0,0
5524	1,009			8,6	6,8
5525*	1,020	35,0	28,5	0,0	0,0
5537	0,997			10,5	2,6
5542	0,998			8,3	3,1
5545	0,975			0,0	0,0
5546	0,957	0,2	0,0	1,7	0,6
5547	0,950	0,3	0,0	1,8	0,7
5550	0,997			0,0	0,0
5552	0,996			0,0	0,0
5553	1,050			25,9	14,1

Com o exame dos dados visualizamos uma menor oscilação dos níveis de tensão na maioria das barras do sistema em comparação aos dados sem GD, e principalmente nas próximas à GD. Podemos perceber também um acréscimo na potência gerada.

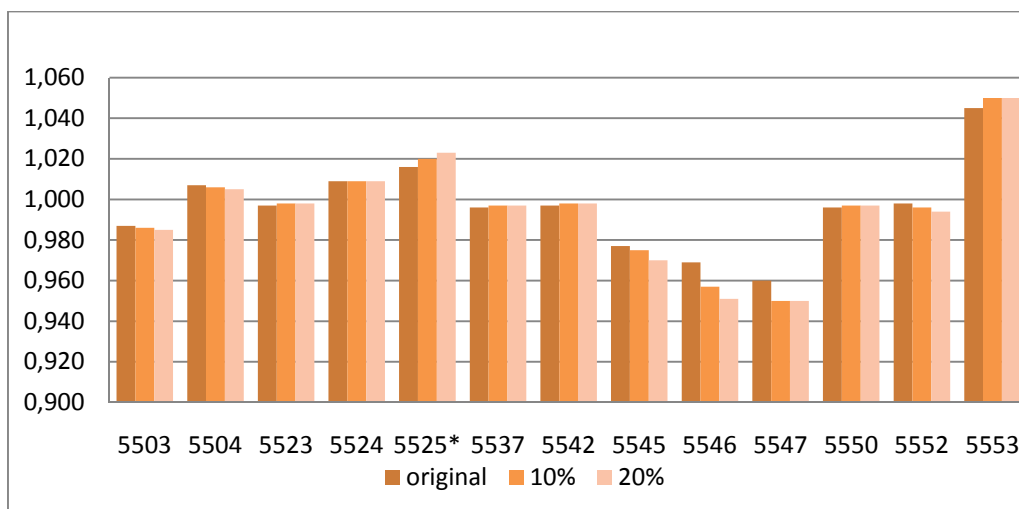
Tabela 5.31 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 1GD com incremento na carga de 20%.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CARGA - 20%	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	0,985			0,0	0,0
5504	1,005			28,4	22,1
5523	0,998	55,2	-19,5	0,0	0,0
5524	1,009			9,4	6,9
5525*	1,023	38,7	32,6	0,0	0,0
5537	0,997			11,4	2,9
5542	0,998			9,0	3,4
5545	0,970			0,0	0,0
5546	0,951	0,2	0,0	1,8	0,6
5547	0,950	0,3	0,0	1,9	0,7
5550	0,997			0,0	0,0
5552	0,994			0,0	0,0
5553	1,050			28,2	14,7

Tabela 5.32 – Otimização da carga com Controle de Tensão 1GD.

<i>Controle Tensão 1GD</i>	Original		10% Aumento		20% Aumento	
	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar
CARGA INICIAL	75,1	25,5	82,9	28,2	90,1	30,7
GERACAO TOTAL	77,9	4,2	86,6	9,0	94,4	13,1
PERDA TOTAL	2,8	2,0	3,7	4,8	4,3	6,8

A Figura 5.9 nos mostra o comportamento das tensões do sistema para os diferentes cenários estudados.

**Figura 5.11** – Perfil de tensão com o controle de perdas 1GD.

5.6.3. Otimização com Controle de Tensão com 2GD

Nesta seção temos dados expostos nas Tabelas 5.27 a 5.30 que nos comprova a melhora do perfil de tensão com a conexão da GD no sistema. As Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 mostram o comportamento da tensão no sistema analisado e visualiza que os perfis de tensão tiveram uma melhora nos seus níveis, principalmente quando da conexão da segunda GD.

Tabela 5.33 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 2 GD com carga inicial.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CARGA	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	0,984	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	1,006	0,0	0,0	23,7	20,5
5523	0,997	43,5	-17,8	0,0	0,0
5524	1,008	0,0	0,0	7,8	6,6
5525*	1,014	29,9	24,9	0,0	0,0
5537	0,993	0,0	0,0	9,5	2,4
5542	0,997	0,0	0,0	7,5	2,8
5545	1,010	4,3	-1,2	0,0	0,0
5546	1,005	0,0	0,0	1,5	0,5
5547	0,996	0,0	0,0	1,6	0,6
5550	0,993	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	0,998	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	0,999	0,0	0,0	23,5	14,6

Tabela 5.34 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 2 GD com incremento na carga de 10%.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CARGA - 10%	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	0,982	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	1,005	0,0	0,0	26,1	21,2
5523	0,997	45,9	-17,2	0,0	0,0
5524	1,008	0,0	0,0	8,6	6,8
5525*	1,013	36,1	22,5	0,0	0,0
5537	0,992	0,0	0,0	10,5	2,6
5542	0,997	0,0	0,0	8,3	3,1
5545	1,017	3,8	4,6	0,0	0,0
5546	1,003	0,0	0,0	1,7	0,6
5547	0,994	0,0	0,0	1,8	0,7
5550	0,993	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	0,997	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	1,001	0,0	0,0	25,9	15,7

Tabela 5.35 – Cálculo do Fluxo de Potência Ótimo com 2 GD com incremento na carga de 20%.

IDENTIFICAÇÃO		GERAÇÃO		CARGA - 20%	
BARRAS (n°)	TENSÃO (pu)	MW	Mvar	MW	Mvar
5503	0,981	0,0	0,0	0,0	0,0
5504	1,004	0,0	0,0	28,4	22,0
5523	0,998	47,7	-16,5	0,0	0,0
5524	1,009	0,0	0,0	9,4	6,9
5525*	1,019	40,3	29,9	0,0	0,0
5537	0,993	0,0	0,0	11,4	2,9
5542	0,998	0,0	0,0	9,0	3,4
5545	1,016	5,1	-0,6	0,0	0,0
5546	1,001	0,0	0,0	1,8	0,6
5547	0,992	0,0	0,0	1,9	0,7
5550	0,994	0,0	0,0	0,0	0,0
5552	0,996	0,0	0,0	0,0	0,0
5553	0,999	0	0	28,2	15,8

Tabela 5.36 – Otimização da carga com Controle de Tensão – 2 GD.

Controle Tensão 2 GD	Original		10% Aumento carga		20% Aumento carga	
	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar
CARGA INICIAL	75,1	25,5	82,9	28,2	90,1	30,7
GERACAO TOTAL	77,8	5,8	85,7	9,9	93,1	12,8
PERDA TOTAL	2,7	1,5	2,8	2,8	3,0	4,0

Observa-se nos dados das Tabelas 5.22, 5.26 e 5.30 que não houve ganhos consideráveis nas potências ativas nem tampouco na minimização das perdas. Isso se deve ao fato de que nesse processo de otimização a função objetivo era o controle da tensão e não as perdas.

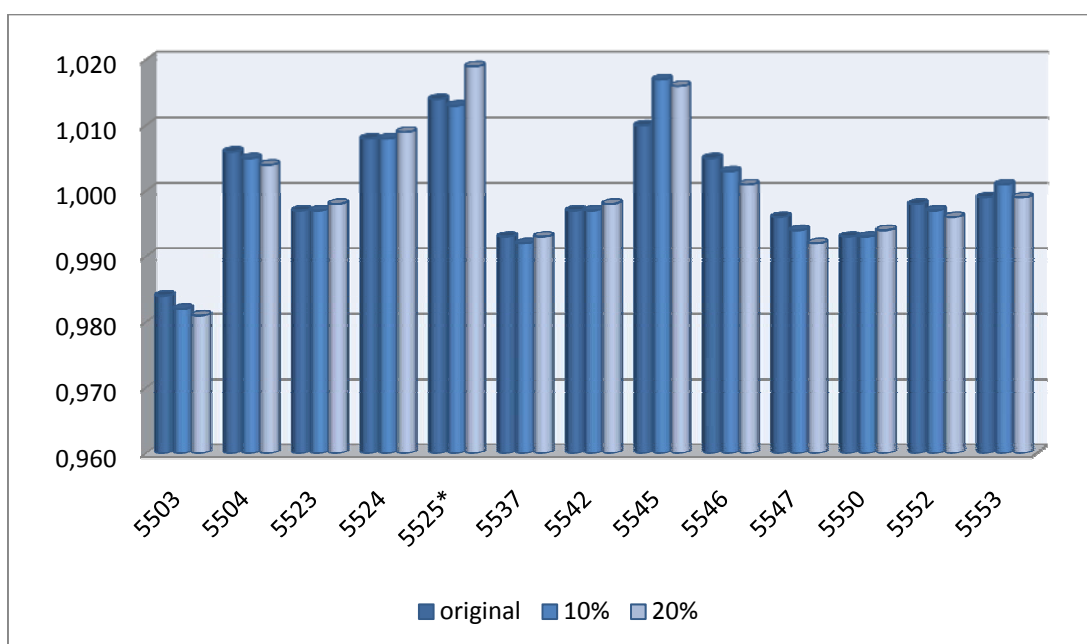


Figura 5.12 – Perfil de tensão com o controle de tensão - 2GD.

Vale ressaltar ainda que poucas barras se aproximaram dos limites entre 95% e 105% estipulados na restrição para a operação do sistema, ficando dentro das faixas operativas impostas.

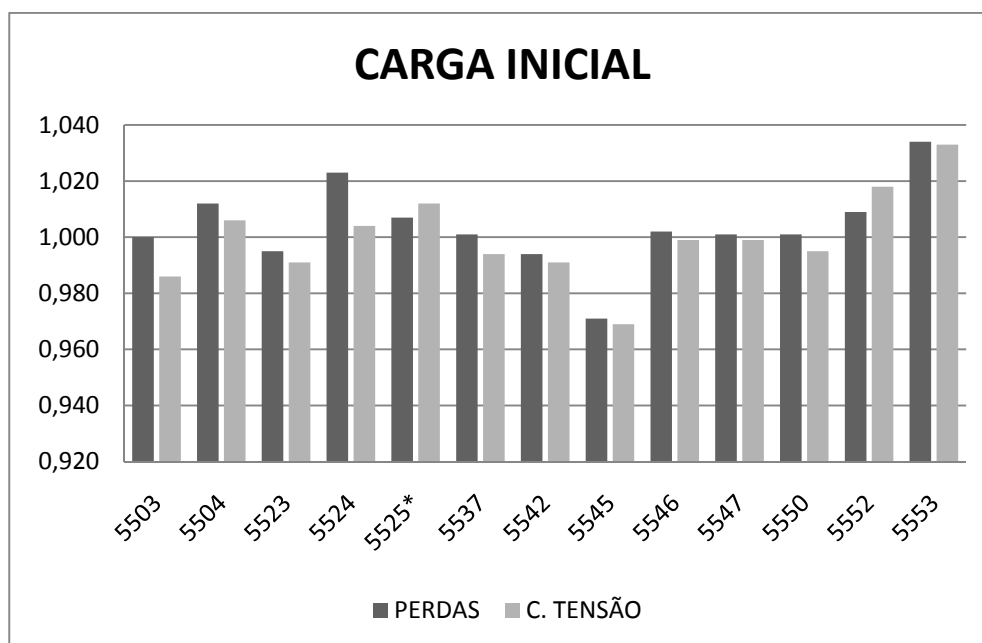
5.7. Análise comparativa “Controle de Tensão X Perdas”.

Esta seção foi construída para podermos examinar simultaneamente o comportamento do sistema quando da otimização por Controle de Tensão e por Perdas, a fim de conhecer as semelhanças, as diferenças ou relações entre elas.

Foram aproveitados os dados das simulações anteriores para realizar as comparações entre as duas funções objetivo de otimização.

Pela observação das Figuras 5.11 a 5.19 que ilustra os perfis de tensão para os três cenários analisados sendo: sem GD, 1 GD e 2 GD, podemos concluir que existe uma grande semelhança nos perfis de tensão das otimizações por Controle de Tensão e por Perdas, porém nota-se que existe uma ligeira diferença dos resultados, não podendo assim dizer que são idênticos.

5.7.1. Confronto “Controle de Tensão x Perdas’ sem GD.

**Figura 5.13** – Perdas x Controle de Tensão – sem GD.

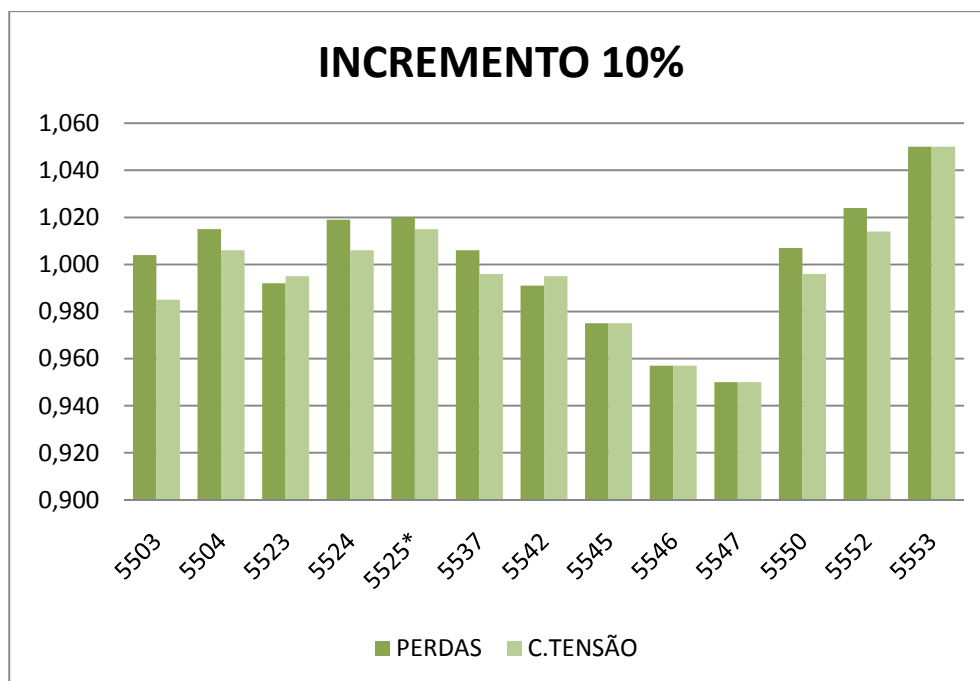


Figura 5.14 – Perdas x Controle de Tensão – sem GD.

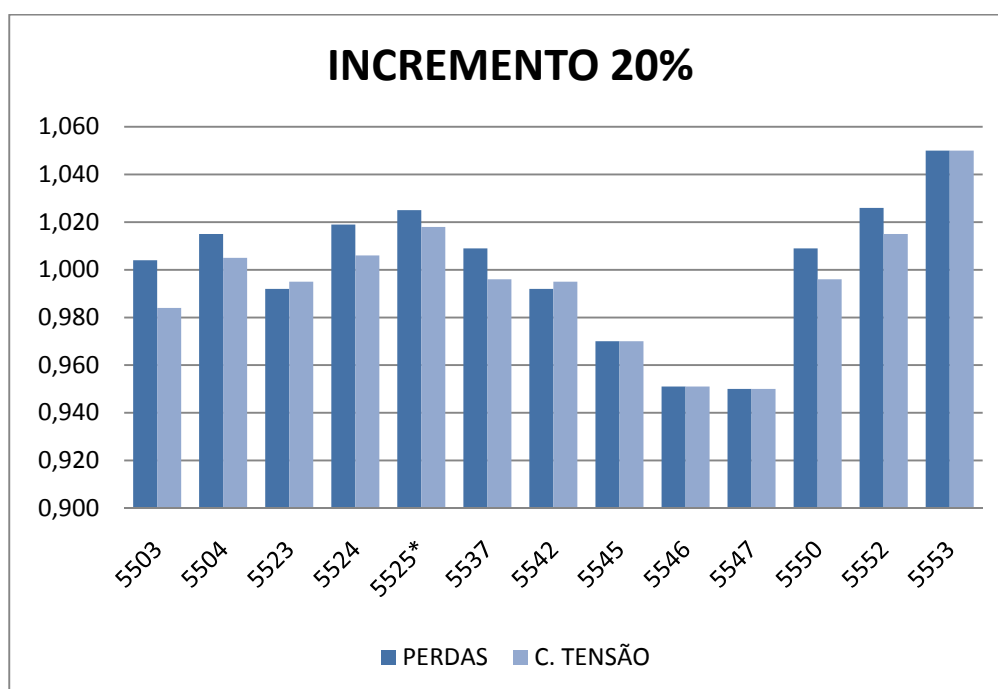


Figura 5.15 – Perdas x Controle de Tensão – sem GD.

5.7.2. Confronto “Controle de Tensão x Perdas’ com 1GD.

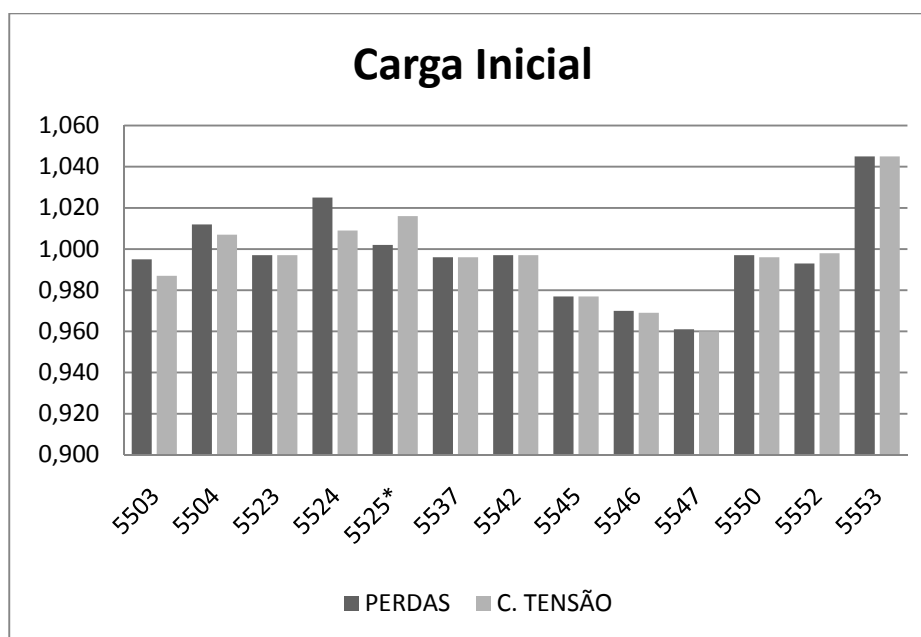


Figura 5.16 – Perdas x Controle de Tensão – 1GD.

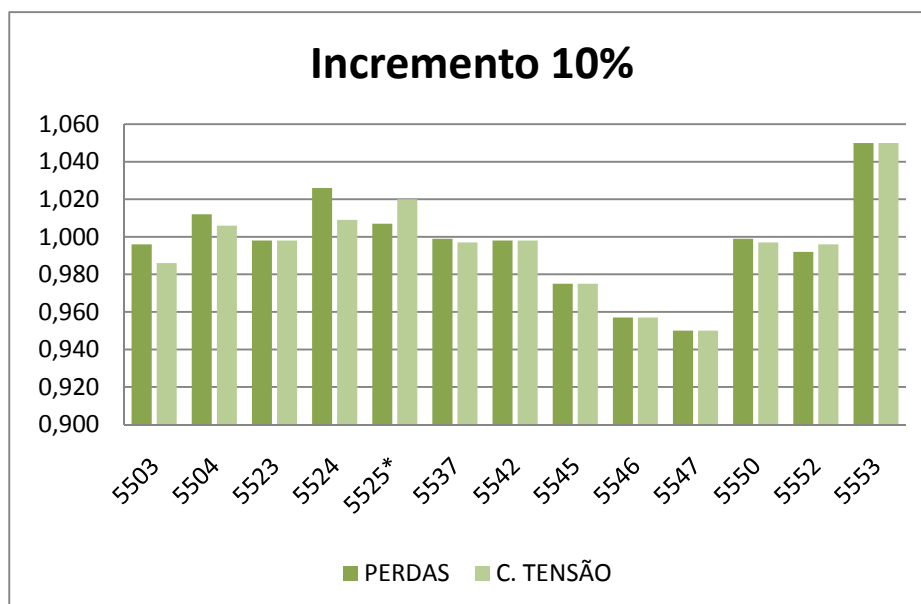


Figura 5.17 – Perdas x Controle de Tensão – 1GD – 10%.

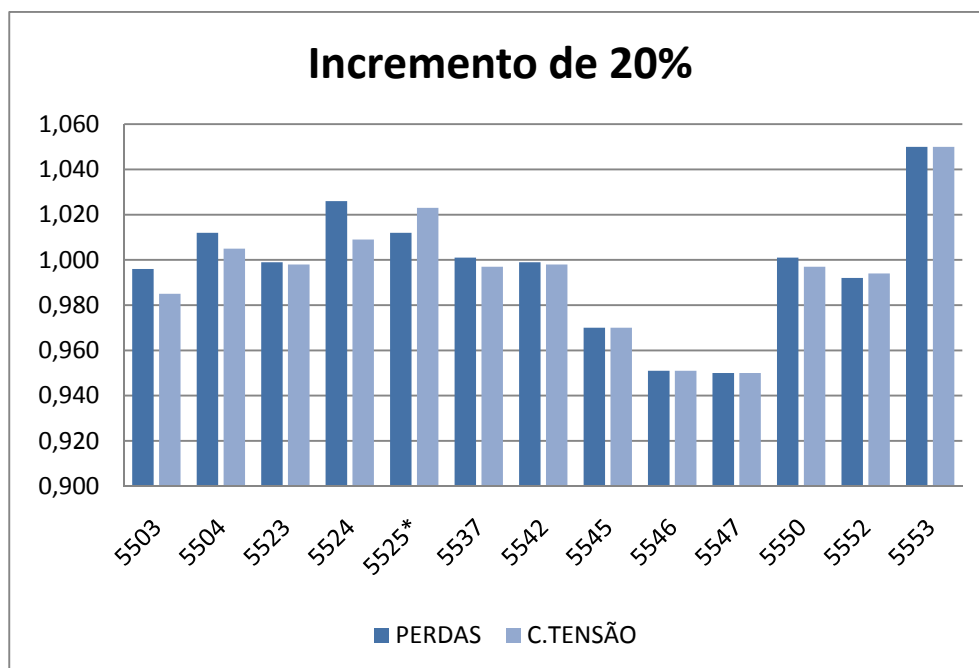


Figura 5.18 – Perdas x Controle de Tensão – 1GD – 20%.

5.7.3. Confronto “Controle de Tensão x Perdas’ com 2GD.

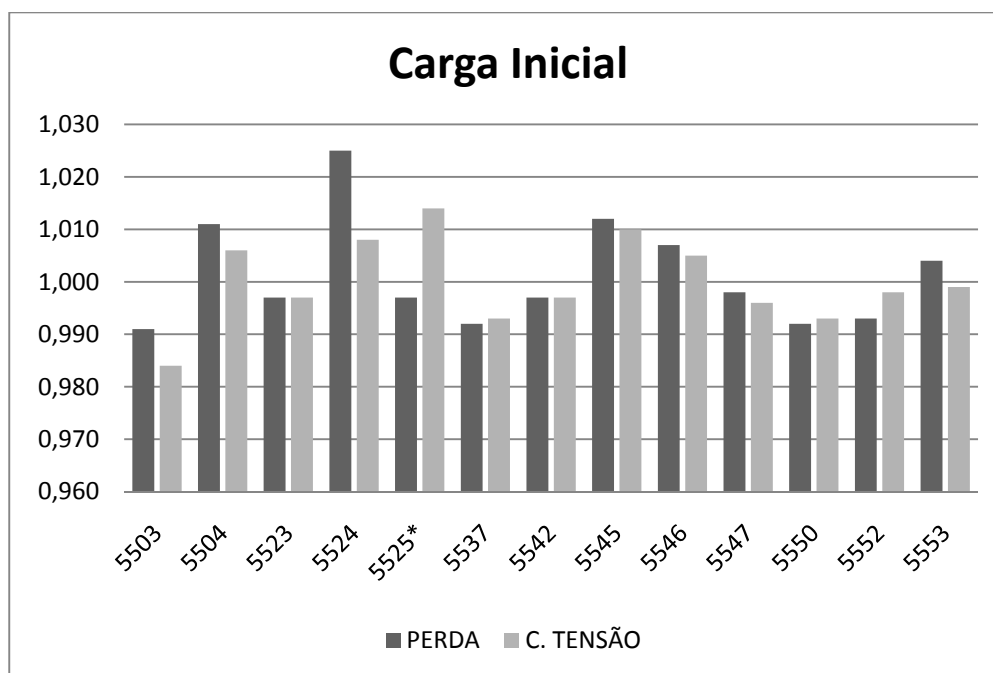


Figura 5.19 – Perdas x Controle de Tensão – 2GD.

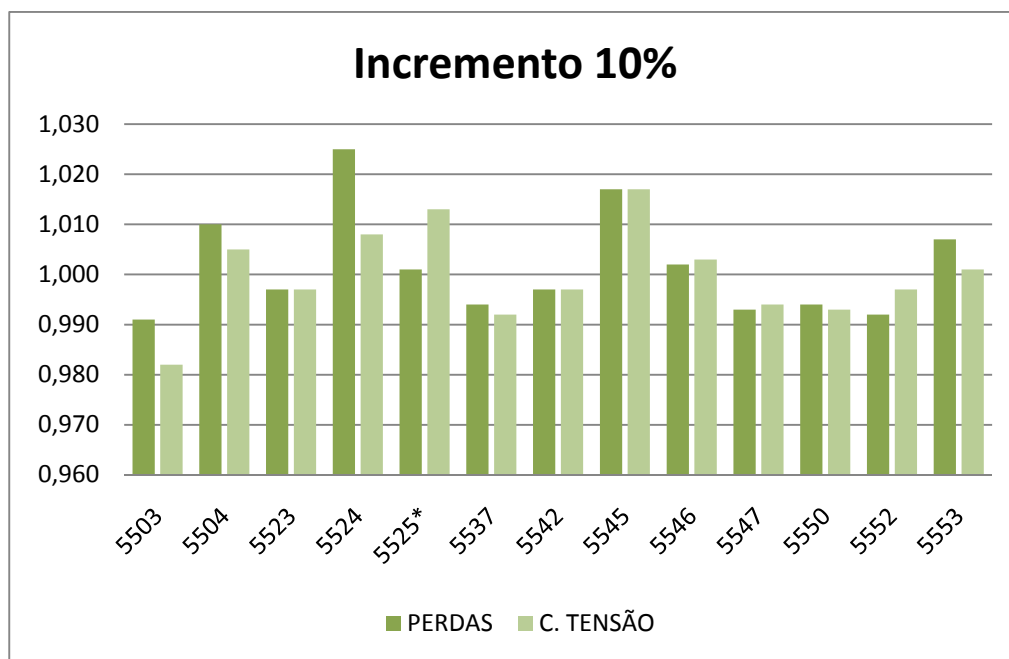


Figura 5.20 – Perdas x Controle de Tensão – 2GD – 10%.

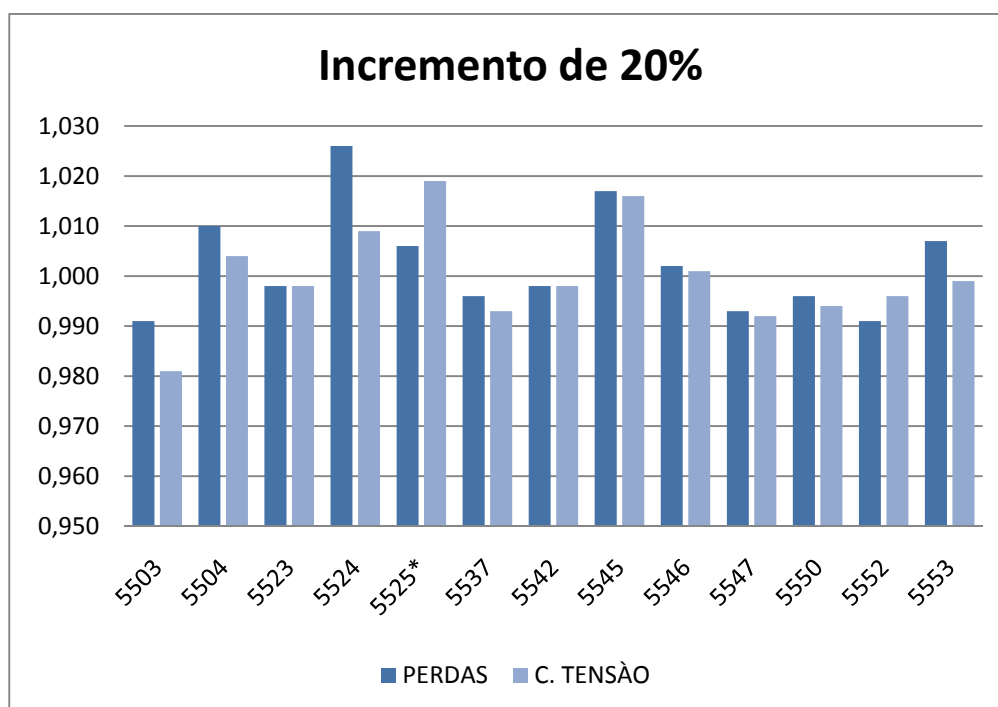


Figura 5.21 – Perdas x Controle de Tensão – 1GD – 20%.

5.8. Conclusão.

Neste capítulo foram apresentados estudos operativos estáticos da conexão de Geradores Distribuídos (GD) num sistema elétrico real, relacionados aos perfis de tensão nos barramentos do sistema, perdas elétricas e ainda maximização da potência gerada.

Os estudos buscaram comparar o desempenho da rede sem a conexão da GD, mostrando que houve melhoramento no carregamento da rede bem como nos perfis de tensão.

Através dos resultados obtidos, pode-se concluir que a inserção de Geradores Distribuídos nas redes de subtransmissão pode gerar uma sobre vida ao sistema e também permitem concluir que com a presença da GD é possível postergar investimentos de reforço na rede.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1. Introdução.

Neste capítulo serão apresentadas e discutidas as principais conclusões referentes aos aspectos abordados no decorrer desta dissertação. Ao final do capítulo, serão sugeridas sugestões para trabalhos futuros.

6.2. Conclusões.

Em nossa pesquisa buscamos avaliar os impactos ocasionados pela conexão da geração distribuída na rede elétrica de subtransmissão numa pequena parte do Sistema real do Meio-oeste de Santa Catarina. Foram analisados aspectos da operação em regime permanente através do Simulador comercial de Fluxo de Potência Ótimo (FLUPOT), desenvolvido pelo CEPEL. Este simulador mostrou-se uma ferramenta adequada para estudos de FPO em redes de subtransmissão, principalmente quanto à junção do sistema de subtransmissão e transmissão no mesmo processo de simulação, porém não se pode dizer o mesmo para sistemas de distribuição que operam com potências baixas, devido à impossibilidade de alterar o valor da potência base do programa que é de 100 MVA.

Para maximizar a GD pelo FLUPOT existe a necessidade de usar a função objetivo de mínimo custo de produção, utilizando um custo menor para a GD em relação ao custo da geração provinda da barra de folga (SE alimentadora). Para o sistema de subtransmissão usado nos estudos, observou-se que em nenhum caso a potência ativa da barra de folga se tornou negativa, ou seja, a GD jamais ultrapassou o valor das cargas conectadas à rede em estudo.

Com base nos resultados obtidos pode-se afirmar ainda que a inclusão da GD na rede elétrica analisada pode aumentar a margem de estabilidade do sistema, reduzir as perdas elétricas na maioria das situações e melhorar o perfil de tensão independentemente da tecnologia empregada. Pode ser também observado nos resultados do fluxo de potência ótimo apresentado, a interligação da GD ocasionou um pequeno aumento das perdas ativas e reativas na área da GD. Entretanto, deve-se averiguar e ponderar qual seria a real

finalidade da instalação da GD na determinada região. Fato que, com a inserção da GD a capacidade de carregamento do sistema aumentou em aproximadamente 20%.

Este fato representa um benefício muito valioso em termos de planejamento e operação de um sistema elétrico, pois pode gerar uma sobre vida ao sistema e conseqüentemente postergar investimentos de reforços na rede.

6.3. Sugestões para trabalhos futuros.

Considerando os resultados obtidos neste trabalho, podem ser sugeridos os seguintes tópicos para trabalhos futuros:

- Repetir os estudos de impacto realizados neste trabalho considerando diferentes e múltiplas funções objetivo e ainda modelar a carga com a tensão.
- Estudo detalhado da GD nos níveis de curto circuito de um sistema de subtransmissão e distribuição. Baseados nos resultados obtidos, criar um índice que avalie o impacto da inserção de GD nas correntes de curto circuito.
- Realizar os estudos de impacto deste trabalho considerando o relaxamento das restrições de tensões e dos limites empregados.
- Estudar o caso em que se faça a otimização fixando a geração seqüencial da GD, analisando o impacto causado no sistema.
- Baseados nos índices propostos, otimizar a alocação dos geradores distribuídos num sistema de distribuição e subtransmissão considerando aspectos técnicos e também econômicos para tal fim.
- Repetir os estudos de impacto realizados neste trabalho considerando diferentes cenários e tecnologias. Além disso, considerar as possíveis alterações da topologia do sistema.